

# プール水中におけるフラッシングと凝縮現象

著者	田村 祥一
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	1998
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00000657/">http://id.nii.ac.jp/1342/00000657/</a>

# 修 士 論 文

題 目 70-11 水中におけるフレッシングと凝縮現象

指導教官 賞 雅 寛 而

商船学研究科  
課程名 商船システム工学専攻

学籍番号・氏名 96114 田村 祥一

平成 10 年 7 月 23 日 提 出

## 目次

第1章	本研究の目的	
1.1	はじめに	2
1.2	従来までの研究	2
1.3	本研究室における昨年までの研究	7
1.4	液中フラッシング解析モデル	8
1.5	本研究の目的	11
1.6	記号	12
第2章	実験装置及び解析方法	
2.1	実験装置	28
2.2	実験・解析方法	28
第3章	実験結果と考察	
3.1	FO 周波数マップ	34
3.2	マップ作成方法と現象マップ	34
3.3	FO 周波数に及ぼす放出方向の影響	36
3.4	プール水中に放出される高圧飽和水流量	36
第4章	結論	50
謝辞		51
参考文献		52
APPENDIX	A 大型船用原子炉 (Marine Reactor X)	54
APPENDIX	B. 解析プログラム	64
APPENDIX	C 実験データ	69

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

現在、先進諸国において、原子炉に対する安全性の向上の要求が高まるとともに、事故時の炉水冠水を維持するために格納容器内に水をプールした水張り式の小中型炉が研究開発されている。このタイプの炉は、圧力容器・配管系の漏洩事故もしくは破断事故(LOCA)時に、内部の飽和蒸気もしくは飽和水が格納容器内のプール水によって冷却されるために、受動的安全性に優れていると言われている<sup>[1]</sup>。さらに、プール水は 2 次遮蔽としても利用され炉本体の重量を大幅に軽減できるために、特に軽量化が課題である船用炉においてメリットが大きい。新型船用炉として現在、日本原子力研究所で開発されつつある Marine Reactor X (MRX)も水張り格納方式の炉の 1 つであり、東京商船大学、筑波大学、船舶技術研究所などにおいて開発のための基礎実験が行われている。

上記のようにこの型の炉では LOCA 時に、高圧飽和水が低圧の常温水中に放出され、このうちの 1 部がフラッシングして蒸気となる。この蒸気はプール水によって急速に凝縮される。これらの個々の過程については、LOCA 時にブローダウン水が格納容器気中でフラッシングする現象として<sup>[2, 3]</sup>、及び BWR の LOCA 時に放出された蒸気がサプレッション水中で凝縮する現象<sup>[4, 6]</sup>として、以下に示すようにそれぞれ多くの研究実績があり、それらのメカニズムはほぼ明らかにされていると言って良い。しかしながら、高温高圧の飽和水が水張り式格納容器内のプール水中に放出されフラッシング・凝縮する現象は、飽和水のフラッシングによって生じた蒸気がプール水中で凝縮するという、上記 2 つの現象が重なって同時進行する現象である。この現象は、水張り格納式原子炉の安全評価上で重要な検討事項だと考えられ、いくつかの実験研究が行われている<sup>[7-16]</sup>。

### 1.2 従来までの研究

#### 1.2-1 空気中への飽和液フラッシング実験

加圧し加熱した液体をその液体温度の飽和蒸気圧以下の低圧系まで急減圧すると、過熱状態になった液体は気泡の成長によって瞬間的に分裂する。この現象は高温加圧水が流れるボイラ配管の破損時や、タンクのドレンなどでみられるフラッシ

ングとして知られている。空間に放出した噴流がフラッシングする現象は例えば液体微粒化の一方法として注目され、液体温度、ノズル寸法などの限定された条件下では様々な研究者によって明らかにされている<sup>[17]</sup>。

滝本らは、単孔ノズルの寸法や材質を変えて空気中への飽和水フラッシング時における気泡の生成と気泡の成長過程を調べている<sup>[18]</sup>。以下にその結果を要約する。

ノズル長さが短い場合の結果は、図 1-1 に示すように液体がノズル内壁にほとんど接触しないため、液体内部の気泡生成と成長によって分裂がおこなわれる。これに対してノズル長さが長い場合には、液柱の長さは短く液体表面の分裂が液体内部の分裂に先行して激しく行われる(図 1-2)。このことは、ノズル内での減圧に伴って液体内部よりもノズル壁面上で気泡の生成が盛んに行われることを示している。ノズル長さによるこのような分裂現象の相違は、主としてノズル内壁に液体が接触する面積に依存するものと考えられるだろう。

ノズル孔径に関しては、大きくなるにつれて気液界面や液体内部の乱れが増大し、またノズルの内壁面積も増大して、壁面の気泡核の数も増える。この結果、図 1-2 のような現象が多くなっている。

ノズルが短い場合〔図 1-3(a)〕では、一般に液体内部からの気泡生成による分裂が行われ、噴射圧力が高いほど非分裂領域が広がる傾向が見られる。いずれの場合にも、各噴射圧力における過熱度と飽和温度からのサブクール度に対応して、分裂現象が圧力とともに変化することがわかる。

Bailey らは放出孔径( $d_v = 0.247, 0.252$  inch)、放出長さ( $l_v = 1.25, 2.5, 5$  inch)のオリフィスを用いて放出飽和水圧力が  $1.37(kgf/cm^2)$  までの高圧飽和水を大気中に放出した実験を行った。

Bailey の実験式<sup>[9]</sup>は、次のように表される。

$$Q_H = C_e C_v A \sqrt{2g(P_H - P_\infty)\rho_H} \quad (1.1)$$

$C_v$  は放出係数であり、ここでは一般的な係数  $C_v = 0.6$  を使用している。

飽和水の蒸発による収縮係数  $C_e$  は、

$$C_e = 1 - 17.2 \times 10^3 K \left[ \frac{l_v}{d_v} \right] \rho_H^{0.5} P_H^{-0.435} Z \quad (1.2)$$

ここでは式(1.1, 2)の単位は  $\rho_H$  (lbm/cu ft),  $P_H, P_\infty$  (psf) を使用している。K と Z

は蒸発係数である。原著によれば一般的に  $K = 2.9 \times 10^{-5}$  ( $lbm/sec\ lbf$ ) であり、 $Z$  は図 1-4 より高温高圧水圧力  $P_H$  と放出側圧力  $P_\infty$  の相関より求めることが出来る。

Benjamin らは放出長さ( $l_v = 0.25$  inch)、放出孔径( $d_v = 0.247 \sim 0.879$  inch)のオリフィスを用いて放出飽和水圧力が  $23(kgf/cm^2)$  までの高圧飽和水を大気中に放出した実験を行った。

Benjamin らの実験式<sup>[19]</sup>は、次のように表される。

$$Q_H = C A \sqrt{2 g \rho_H (P_H - P_\infty)} \quad (1.3)$$

ここで、 $C$  はオリフィスの放出係数である。 $C$  は原著に示されている放出飽和水圧力  $P_H$  と放出側圧力  $P_\infty$  の圧力差より求められる (図 1-5)。

一般的な放出係数  $C_v = 0.6$  をかけることにより、

$$Q_H = C C_v A \sqrt{2 g \rho_H (P_H - P_\infty)} \quad (1.4)$$

を得る。

Pasqua は絞り径比( $L/D = 4.4 \sim 23.5$ )のテスト管を用いて飽和状態のフレオン 12 を放出した実験を行った。実験では飽和状態のフレオン 12 の圧力が  $2.55(kgf/cm^2)$  までの圧力で実験を行っている。

Pasqua の実験式<sup>[20]</sup>は、次のように表される。

$$Q = C_e C_v A \sqrt{2 g \rho_H (P_H - P_\infty)} \quad (1.5)$$

$C_v$  は放出係数であり、ここでは一般的な  $C_v = 0.6$  を使用している。

飽和水の蒸発による収縮係数  $C_e$  は、

$$C_e = \left[ \frac{1}{(1/C_v^2)(A/B) + 1} \right]^{0.2} \quad (1.6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A &= 0.37(l_v/d_v)^{0.2} - P_\infty / P_H \\ B &= 1 - 0.37(l_v/d_v)^{0.2} \end{aligned} \quad (1.7)$$

である。

Hayamizu らは放出孔径が 2 ～40 (mm)の大口径管を使用して放出飽和水圧力が 5, 7(MPa)の条件で大気圧に放出した実験を行っている。

Hayamizu らの実験式<sup>[21]</sup>は、次のように表される。

$$Q = C A \sqrt{2 g \rho_H (P_H - P_x)} \quad (1.8)$$

放出係数  $C$  は放出飽和水圧力、サブクール度によらず  $C = 0.588$  としている。

## 1.2-2 飽和蒸気をプール水中へ放出する実験

沸騰水型原子炉の圧力抑制型格納容器では、冷却材喪失事故時に一次冷却系から流出する高温の蒸気をベント管を通してプール水中で凝縮させることによって格納容器内圧の上昇を抑える構造を採っている。蒸気がプール水中で凝縮する際には、蒸気の流量やプール水温に依存して以下に示すパターンの圧力振動がベント管出口で発生することがわかっている。

### (1) チャギング

蒸気流速が小さく、プール水温がある値以下では図 1-6 に示すように、間欠的なプール水のベント管内への逆流を繰り返す「チャギング」現象が発生する。この現象は、界面がベント管外へ出ている間の凝縮速度がベント管内を流れる平均的蒸気流束を上回るときに、起こるものと考えられている。

チャギング状態から蒸気流束を増加させていくとチャギング発生間隔は次第に短くなり、ついにはプール水のベント管内へ逆流が起こらなくなるというチャギングの蒸気流束限界が現れる。更に蒸気流速を増すと気泡凝縮振動領域にはいる。逆に蒸気流束を減じていくと、ベント管内の界面がベント管外へ出ないうちに再び上昇し始めるという流体振動が通常のチャギング振動の中に混ざってくる。

チャギング時のベント管内の圧力波形は図 1-7 に示すように、チャギング発生に同期した振幅の小さい低周波の圧力振動に周波数の高い成分が重畳している。この高周波成分は急激な負圧として始まり、その直後に正圧の最大ピークが現れた後、徐々に圧力振幅が減ずるリングアウト波形を示す。

### (2) 気泡凝縮振動

蒸気流束の高い領域で生ずる「気泡凝縮振動(CO)」では、気泡界面波は常にベント管外のプール水中にあって膨張と収縮を繰り返す(図 1-8)。騒音を伴い界面が白く不鮮明になる。蒸気の凝縮は、界面変動の影響を受け変動するであろうが、ほぼ連続して行われていると考えられる。

圧力振動は、高周波成分が卓越する。その周波数は、チャギング時の高周波成分と同じオーダーであり、ベント管径ばかりでなくプール水のサブクール度の影響を受けるが、蒸気流束の影響は小さい。

### (3) バブリング

プール水温度を上昇させると、騒音が急に静かになるとともに界面がはっきり見えるようになる。このような振動様式マップを「バブリング」振動という。

ベント管内の圧力波形は、ベント管出口を包み込むような形をした蒸気泡の膨張と収縮による低周波のみとなる。その振幅は低温における高周波成分に比べて小さいが、蒸気泡の不均衡凝縮に起因するとみられる水平力がベント管に加わるのがこの様式の特徴である。

図 1-9 に各振動パターンの発生領域を示す。

本研究に関連すると思われる平成 3 年度の実験を要約する。

平成 3 年度は、チャギング領域の主な振動周波数成分と圧力波の進行速度、及びレーザー・ドップラー流速計(LDV)により供給される蒸気の数値変化を調べる実験を行っている。蒸気流束( $3.57 \sim 29.65 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )及びプール水温度( $30 \sim 50^\circ\text{C}$ )がパラメータとなっている。実験装置を図 1-10 に示す。

図 1-11 に CO 領域、図 1-12 (1), (2)にチャギング領域の主な振動周波数成分を示す。CO 領域では 180 (Hz)付近に卓越周波数が確認できる。また、チャギング領域では計測されたほとんどの条件で図 1-12(1)にみられるように 100 (Hz)及び 310 (Hz)付近に卓越周波数が確認できる。

図 1-13 に CO 領域の位相差の例を示す。0~300 (Hz)の間では、右上がり一定の傾きを持った直線で近似でき、圧力変動が管内を蒸気泡からヘッダーに向かって進む進行波になっていることがわかる。図 1-11 に示したように進行波域にある周波数が卓越していることから、CO 領域で発生する振動はベント管外の蒸気泡をコントロール容積とするものである。図 1-14 にチャギング領域の典型的な位相差を示す。0~120 (Hz)間では定常波に、120~300 (Hz)間では進行波になっていること



から、チャギング領域では二種類の振動が混在している。典型的なチャギングでは図 1-12(1)に示すように定常波域である周波数が卓越していること、またこの周波数がプール水サブクール度や蒸気流束を変えても変化しないことから 100 (Hz)及び 310 (Hz)付近の周波数ピークは管内気中の固有振動数のそれぞれ 1/4, 3/4 波長であることがわかる。

また、実験により CO は、ベント管出口で気泡が成長を繰り返し、これと同じ周波数でベント管出口圧力が振動している現象であることが明らかになっている。この振動周波数は、サブクール度の増加、及びベント管内径の減少とともに増大する。

### 1. 3 本研究室における昨年度までの研究

本研究室ではこれまでに、プール水中に高圧飽和水を放出させベント管内部とプール水中の圧力振幅と振動周波数の測定を行ってきた。

現在までに、明らかとなっている事項

は次の通りである。

1. フラッシング振動(FO)は高圧飽和水をプール水中に放出したとき起こる。図 1-15 は現象のビデオ画像である。フラッシングは、ベント管出口近傍とベント管出口からある程度離れた位置で起きている。ベント管出口近傍で起こるフラッシングを Phase A、ベント管出口からある程度離れた位置で起こるフラッシングを Phase B と呼ぶ。ベント管とプール水中の圧力はフラッシング振動によって変化する。本研究において観測された FO 現象における圧力振動とフラッシングの位置の変動は、フラッシングする蒸気泡への高圧飽和水の供給と、蒸気-プール水界面での凝縮のバランスによって生じているものと考えられる(図 1-16)。
2. FO 現象はベント管の長さにはほとんど影響されない。FO の振動数は、プール水の蒸気泡とプール水中噴出飽和水からなるコントロール容積による。これもまた、FO 現象における圧力振動とフラッシングの位置の変動は、フラッシングする蒸気泡への高圧飽和水の供給と、蒸気-プール水界面での凝縮のバランスによって生じているものと考えられる。

## 1.4 液中フラッシング解析モデル

1.2 - 2 に示したように、蒸気凝縮による振動現象は、流動条件によっていくつかの凝縮の形態を生じることが明らかにされている<sup>[22 - 24]</sup>。これらの中の CO の周波数は、ベント管径数 cm の小規模装置では 100~300 Hz である。CO の周波数については、原子炉内部の構造共鳴との関連から関心が持たれ、そのメカニズム解明の研究がなされた。そして、CO のコントロール容積はプール水中の蒸気泡であって、周波数は小規模装置においてベント出口に形成される蒸気泡の線形不安定振動数として説明できることが明らかにされた。

本研究において観測された FO 現象における圧力振動とフラッシングの位置の変動も、基本的には CO と同様に、フラッシングする蒸気泡への高圧飽和水の供給と、蒸気-プール水界面での凝縮のバランスによって生じているものと考えられる(図 1-16)。フラッシングが管出口近傍で生じる(Phase A)。蒸気-プール水界面での凝縮により蒸気は崩壊(収縮)する。水の慣性力によって圧力パルスを生じ<sup>[25]</sup>、高圧飽和水との圧力差が少なくなる。従って管出口近傍のフラッシングが止まり、高圧飽和水のままプール水中に噴出し、ベント管出口からある程度離れた位置でフラッシングを生じる(Phase B)。管出口近傍の圧力は低くなり再び管出口近傍でのフラッシングが生じ、次のサイクルに移る。

そこで FO のコントロール容積がプール水中噴出飽和水と蒸気泡であるとの仮定に基づいて、CO と同様に蒸気泡の不安定振動数の線形解析<sup>[4, 23, 25, 26]</sup>から FO の周波数に及ぼす実験パラメータの影響の理論的考察を試みる。実際の蒸気泡の界面形状は、図 1-15 にみられるようになりかなり複雑である。しかしながら、CO の線形解析では、蒸気泡をモデル化する際に円筒気泡、球形気泡もしくは半球形気泡のいずれを用いても計算される周波数にそれほど違いがでないことが確認されている<sup>[22]</sup>。従ってここでは図 1-17 に示されるような球形蒸気泡を用いて現象を単純化し、FO における Phase A と Phase B の蒸気界面の運動を球形気泡の膨張収縮で模擬することにする。

高圧飽和水が低圧部に放出されてフラッシングする場合、全ての飽和水がフラッシングするのではなく、飽和水の熱量によってフラッシング量  $Q_s$  は変わる。ここでは単純に高圧飽和水の熱量  $Q_H$  に比例するとする。

$$Q_S = a Q_H \quad (1.9)$$

蒸気泡内の蒸気の連続式は、

$$\frac{d(\rho_S V_S)}{dt} = a Q_H - h(4\pi r^2) \frac{\Delta T}{L} \quad (1.10)$$

定常状態では、

$$a Q_H = h(4\pi r_0^2) \frac{\Delta T}{L} \quad (1.11)$$

一方、蒸気泡の運動方程式は、

$$r \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{3}{2} \left[ \frac{dr}{dt} \right]^2 = \frac{P_S - P_\infty}{\rho_L} \quad (1.12)$$

$r = r_0 + \delta r$  とおき、式(1.12)を時間  $t$  で微分し、微少項の積を省略すると、

$$r_0 \frac{d^3 \delta r}{dt^3} = \frac{1}{\rho_L} \frac{dP_S}{dt} \quad (1.13)$$

気泡の体積  $V_S$  は、

$$V_S = \frac{4}{3} \pi (r_0 + \delta r)^3 \quad (1.14)$$

式(1.11)から式(1.14)を使って、式(1.10)を  $\delta r$  で表すと、

$$4\pi r_0^2 \rho_S \frac{d\delta r}{dt} + \frac{4}{3} \pi r_0^3 \left[ \frac{\partial \rho_S}{\partial P} \right] \frac{dP_S}{dt} + 8\pi r_0 h \frac{\Delta T}{L} \delta r + 4\pi r_0^2 \frac{h}{L} \delta(\Delta T) = 0 \quad (1.15)$$

式(1.13)より、

$$\delta P_S = r_0 \rho_L \frac{d^2 \delta r}{dt^2} \quad (1.16)$$

$\delta(\Delta T) = (\partial T_S / \partial P) \delta(P_S)$ 、式(1.11)及び式(1.16)を式(1.15)に代入して整理すると、

$$\frac{d^3 \delta r}{dt^3} + B_1 \frac{d^2 \delta r}{dt^2} + B_2 \frac{d \delta r}{dt} + B_3 \delta r = 0 \quad (1.17)$$

ただし、

$$B_1 = 6 \left[ \frac{\pi \Delta T}{a Q_H} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{h}{L} \right]^{\frac{3}{2}} \left[ \frac{\partial T_s}{\partial \rho_s} \right]$$

$$B_2 = 12 \left[ \frac{\pi}{a Q_H} \right] \left[ \frac{\rho_s}{\rho_L} \right] \left[ \frac{h \Delta T}{L} \right] \left[ \frac{\partial P}{\partial \rho_s} \right]$$

$$B_3 = \frac{48}{\rho_L} \left[ \frac{\pi}{a Q_H} \right]^{\frac{3}{2}} \left[ \frac{h \Delta T}{L} \right]^{\frac{5}{2}} \left[ \frac{\partial P}{\partial \rho_s} \right]$$

式(1.17)の特性方程式は、

$$S^3 + B_1 S^2 + B_2 S + B_3 = 0 \quad (1.18)$$

蒸気泡の界面が振動的である時、その各周波数  $\omega$  は式(1.18)の根の虚数部として与えられるが、界面の運動が凝縮支配であるときには、式(1.19)が  $\omega$  の良い近似を与える<sup>[14]</sup>。

$$\omega = \frac{\sqrt{3}}{2} B_3^{\frac{1}{3}} \quad (1.19)$$

従って、FO 現象の周波数  $\nu (= \omega / 2\pi)$  は、

$$\nu = \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left\{ \frac{48}{\rho_L} \left[ \frac{\pi}{a Q_H} \right]^{\frac{3}{2}} \left[ \frac{h \Delta T}{L} \right]^{\frac{5}{2}} \left[ \frac{\partial P}{\partial \rho_s} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (1.20)$$

物性値が一定であるとする、

$$\nu = \text{const} \frac{[h \Delta T]^{\frac{5}{6}}}{[a Q_H]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.21)$$

式(1.21)においてフラッシング率  $a$  は、高圧飽和水と低圧飽和水のエンタルピー

差にほぼ比例するが、ここでは簡単化のために  $a=const$  とおく。さらに気泡界面の熱伝達率  $h$  を一定とおけば、

$$v = const \frac{\Delta T^{\frac{5}{6}}}{Q_H^{\frac{1}{2}}} \quad (1.22)$$

乱流オリフィス系の流量は圧力差  $\Delta P$  の  $1/2$  乗に比例することが実験的に確認されている<sup>[5]</sup>。本実験では  $\Delta P_H \doteq P_H$  であるために  $Q_H \propto d_V^2 \cdot P_H^{\frac{1}{2}}$  になる。従って式 (1.22) より、

$$v = const \frac{\Delta T^{\frac{5}{6}}}{d_V P_H^{\frac{1}{4}}} \quad (1.23)$$

上式より、サブクール度の増加と放出孔径、及び高圧飽和水圧力の減少につれて、FO の周波数  $\nu$  は増加する傾向にあることがわかる。

## 1. 5 本研究の目的

前述したように、大型船用原子炉 MRX では、LOCA 等の事故時に高温高圧の飽和水が低圧常温の水張り式格納容器内のプール水中に放出されフラッシング・凝縮する現象が生じる。この現象は水張り格納方式原子炉の安全評価上で重要な検討事項となるため、いくつかの実験的研究が行われている。また昨年までの、本実験室での研究によりこの現象の基本的メカニズムはほぼ明らかになっている。

本研究では、これらの実験結果を踏まえた上で、実験条件を広げ、次のような目的で高圧飽和水をプール水中に放出する実験を行った。

- (1) 放出飽和水圧力、プール水温度、ベント管の放出孔径、及び放出ノズル長さの各パラメータがプール水中のフラッシング凝縮現象に及ぼす影響を明らかにすること。
- (2) ベント管出口方向、すなわち放出ノズル方向を鉛直下向きと横向きにする事によって、放出方向がフラッシング振動の周波数に及ぼす影響を明

らかにすること。

- (3) 高圧飽和水がプール水中に流入する際の流量を測定し、気中に高圧飽和水を流したときの他の実験者との比較を行う。

## 1. 6 記号

### NOMENCLATURE

$a$	coefficient
$C$	coefficient of discharge
$\dot{C}_e$	coefficient of contraction of the liquid cone due to the evaporation
$C_v$	coefficient of contraction of a nozzle
$d_v$	vent hole (nozzle) diameter
$g$	gravity
$h$	heat transfer coefficient
$K$	coefficient of evaporation
$L$	latent heat of evaporation
$l_v$	nozzle length
$P$	pressure
$P_\infty$	ambient pressure
$Q_H$	mass flow rate of saturated water
$Q_S$	mass flow rate of steam generated by flashing
$r$	radius of steam bubble
$T$	temperature
$\Delta T$	degree of subcooling
$t$	time
$V_S$	volume of steam bubble
$Z$	a function of $P$ and $P_\infty$
$\nu$	frequency of pressure oscillation or FO
$\rho$	density
$\omega$	angular velocity

## SUBSCRIPTS

$H$  saturated water

$L$  pool water

$s$  steam

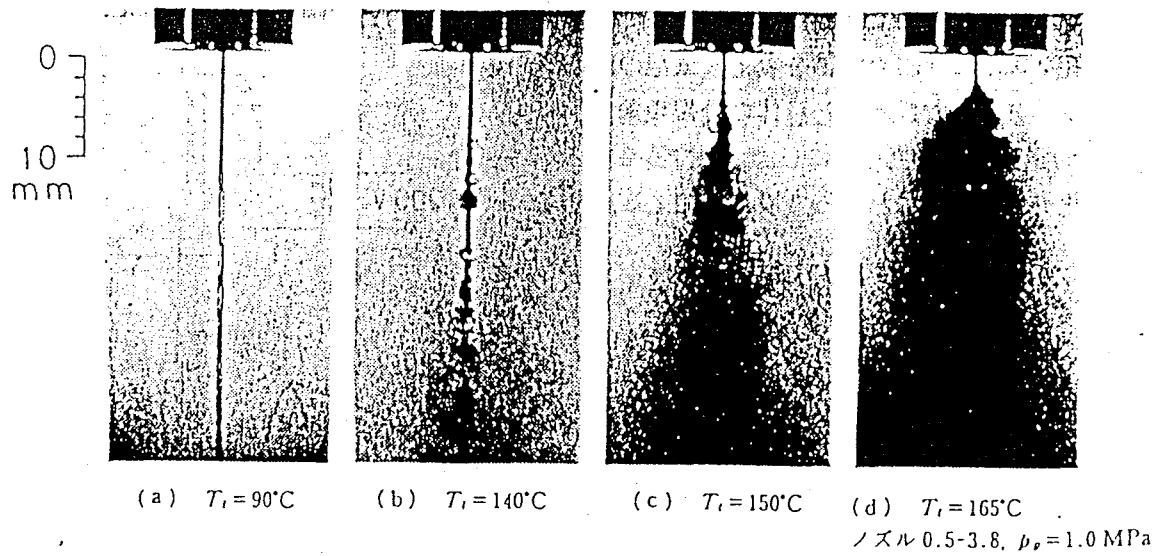


図 1-1 液体の分裂現象 ( $L/D < 7$  の場合)

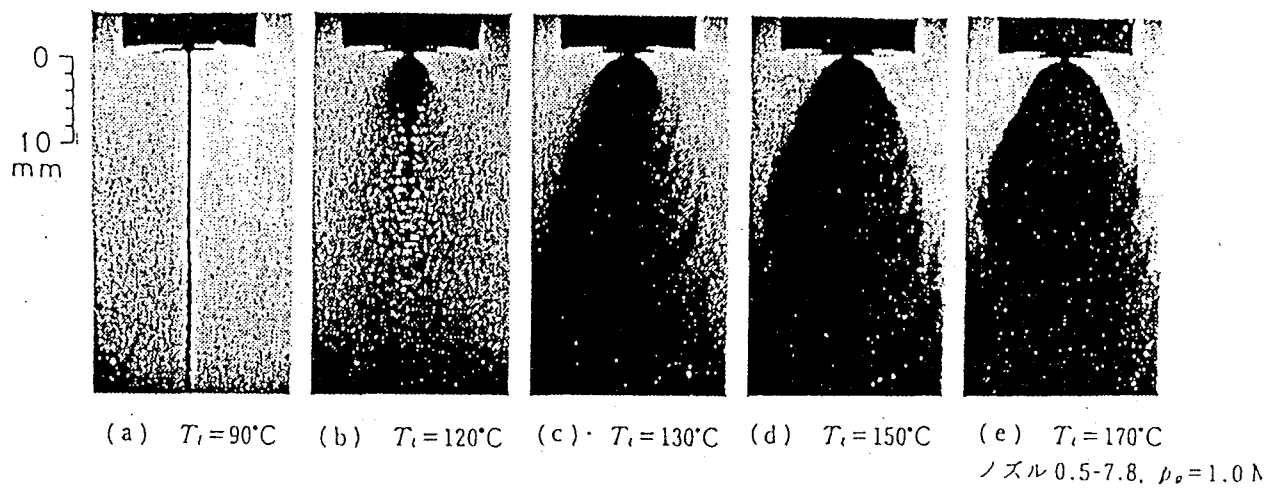
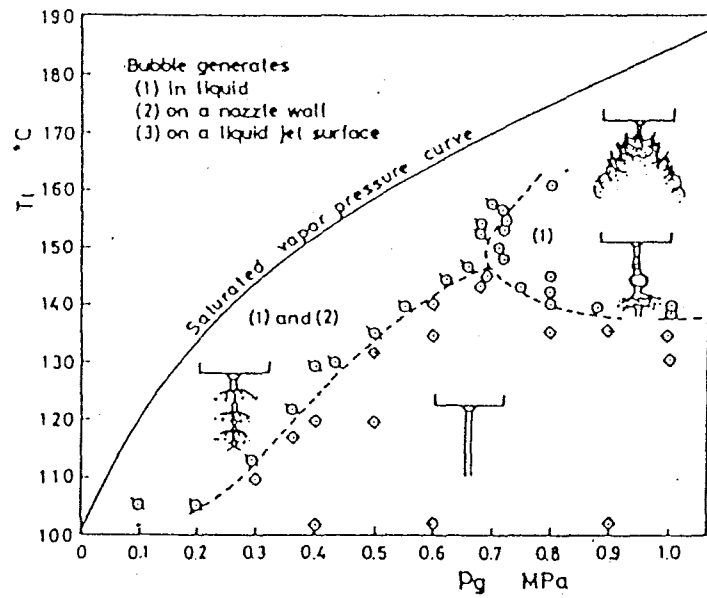
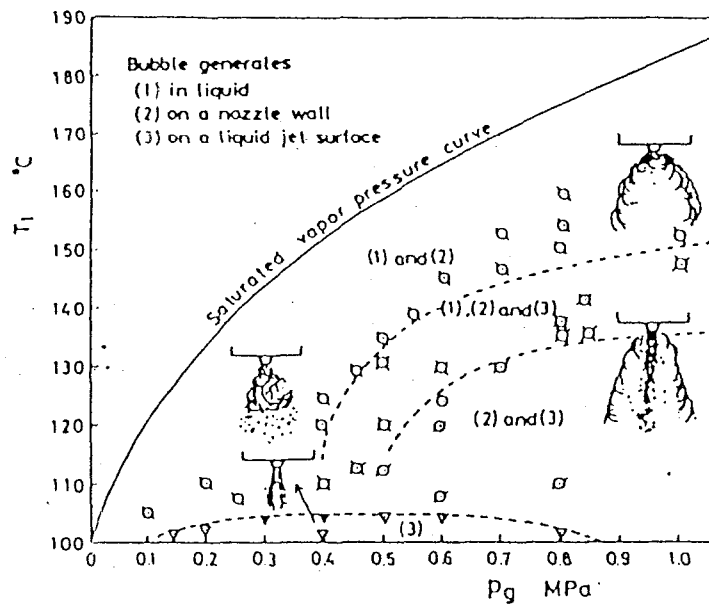


図 1-2 液体の分裂現象 ( $L/D > 7$  の場合)





(a) ノズル 0.5-3.8



(b) ノズル 0.5-7.8

図 1-3 噴射圧力に対する分裂の分類

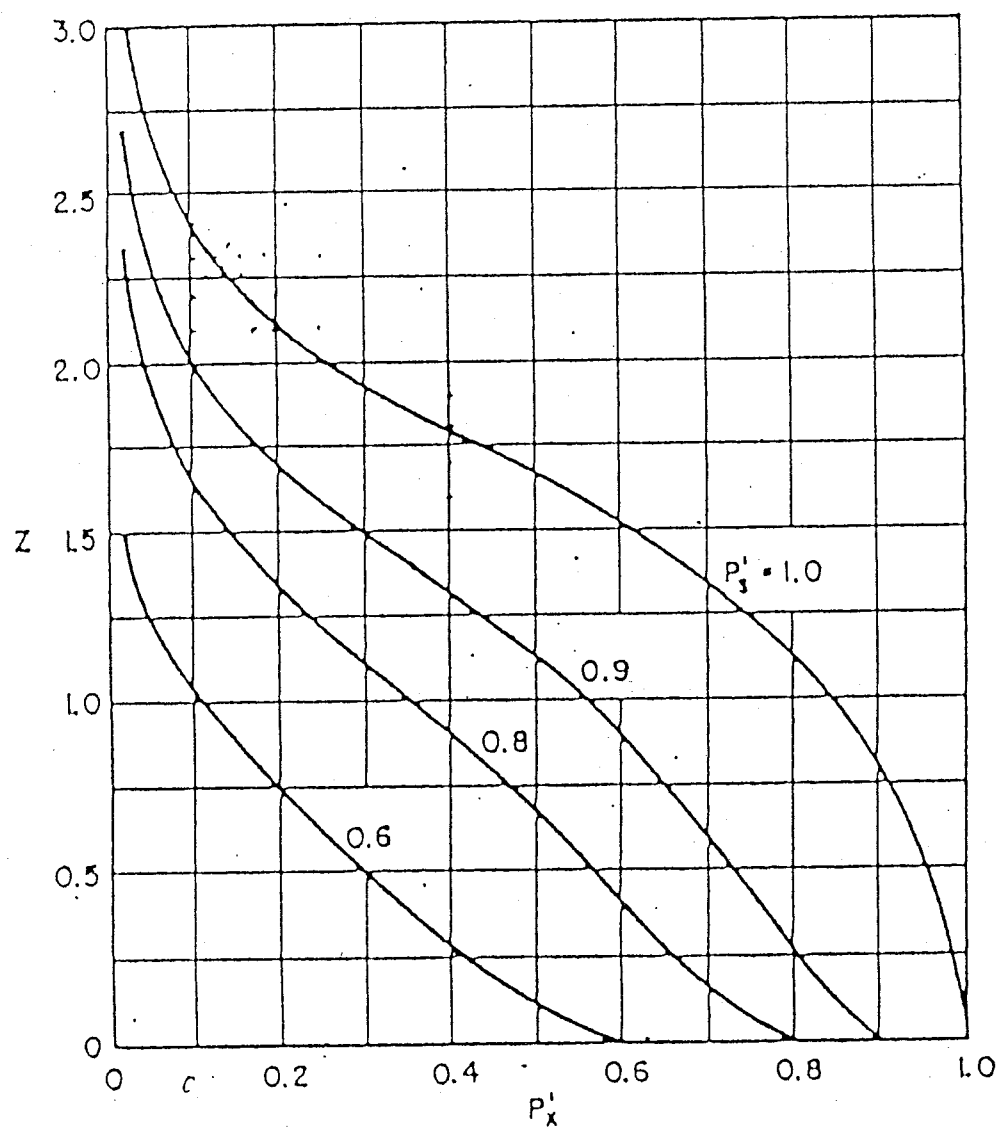


図 1-4  $P_H$ と  $P_\infty$ の相関図 ( $P'_x = P_H/P_\infty$ ,  $P'_s = P_H/P_H'$ )

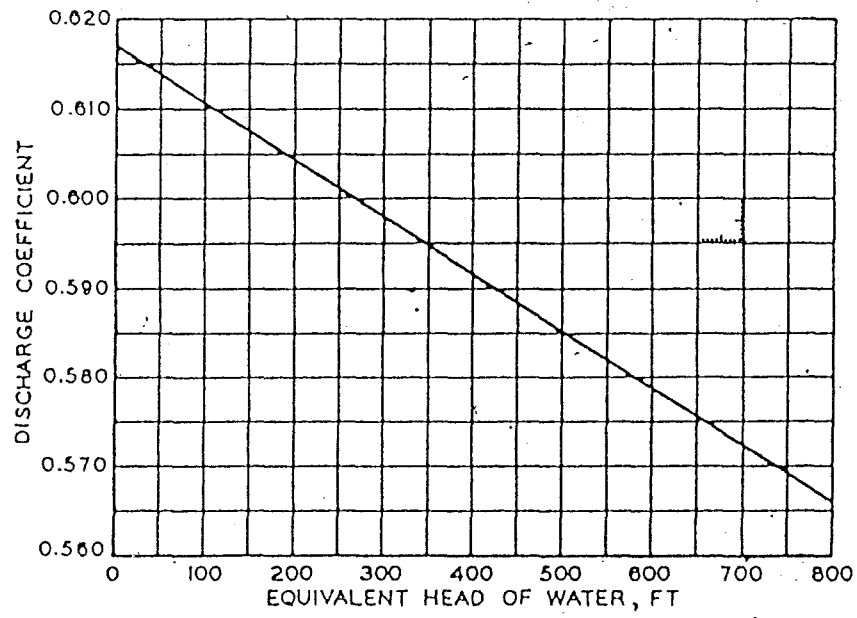


図 1-5 オリフィスを通過する際の飽和水の放出係数

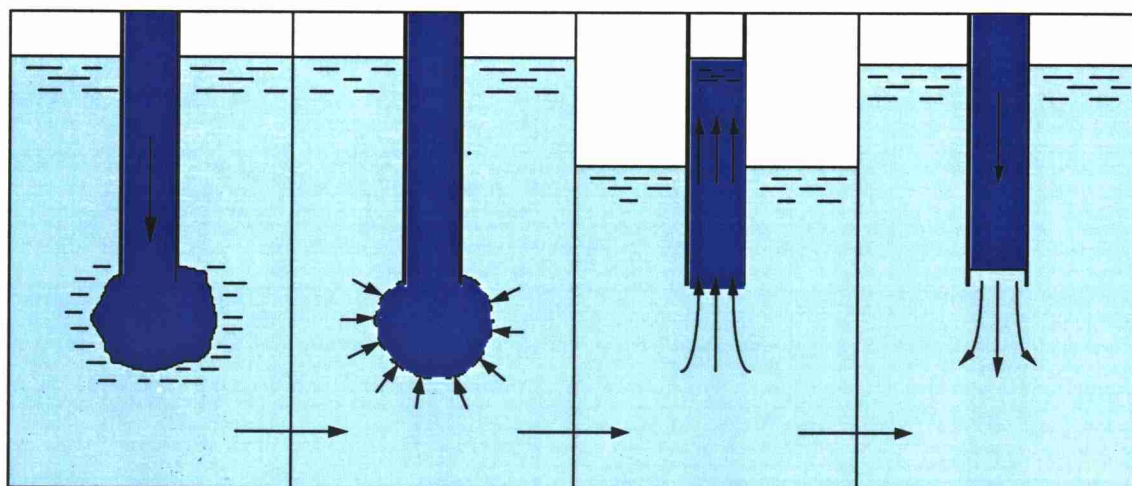


図 1-6 チャギング現象

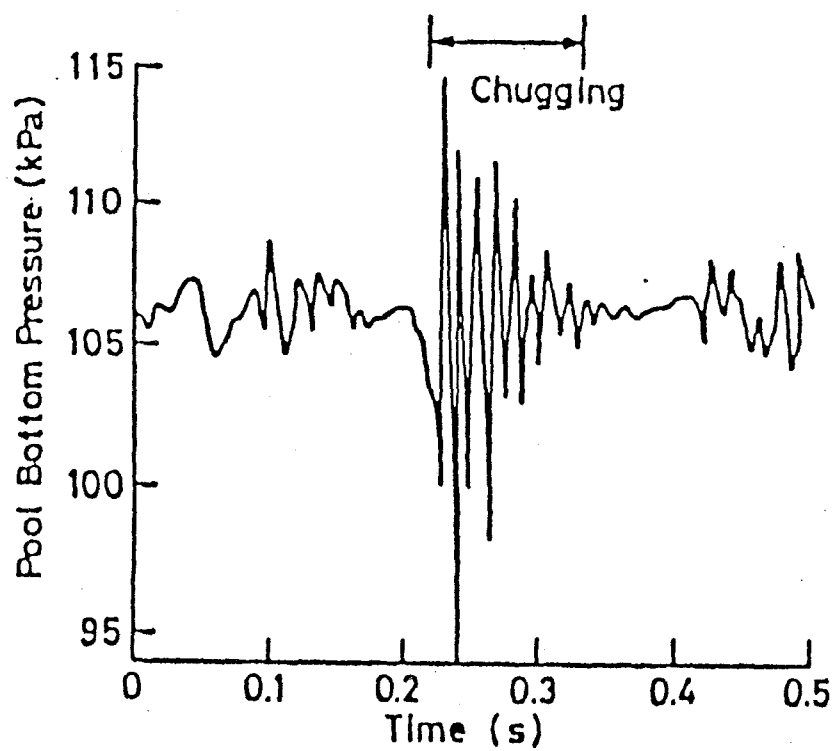


図 1-7 チャギング時の管内圧力波形

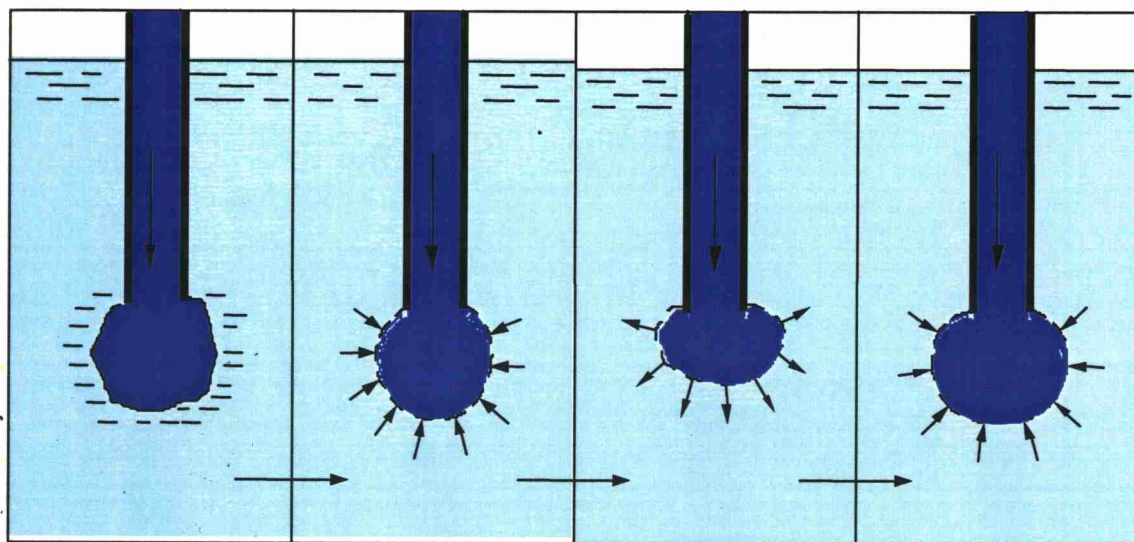


圖 1-8 氣泡凝縮振動(CO)

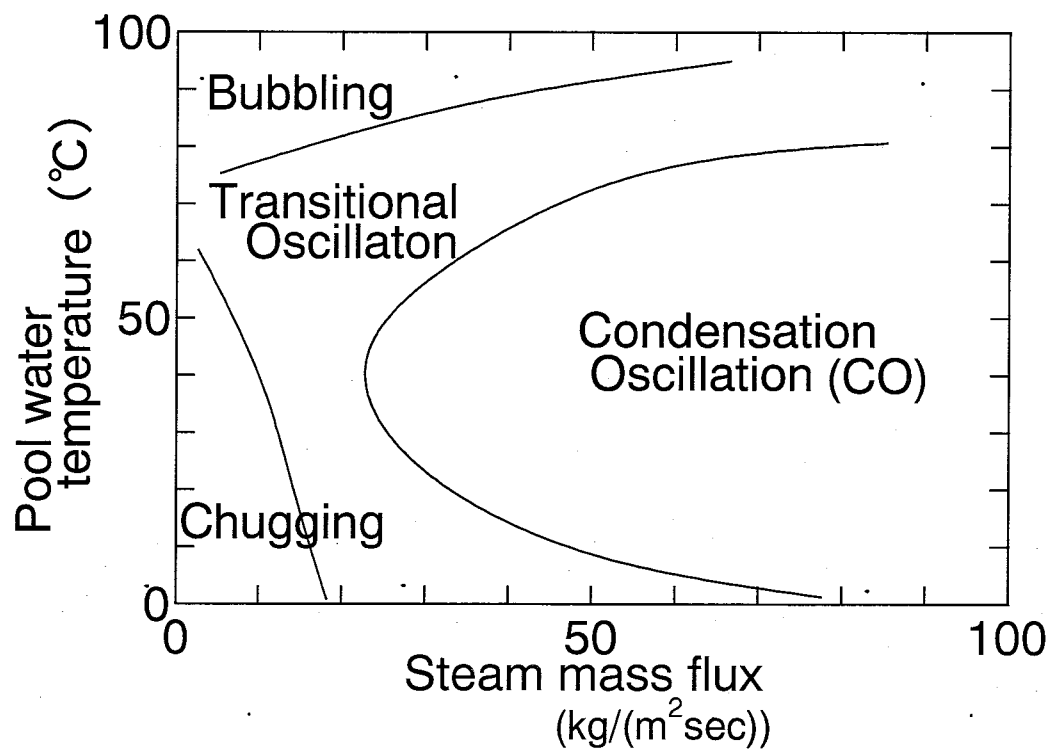


図 1-9 振動様式マップ

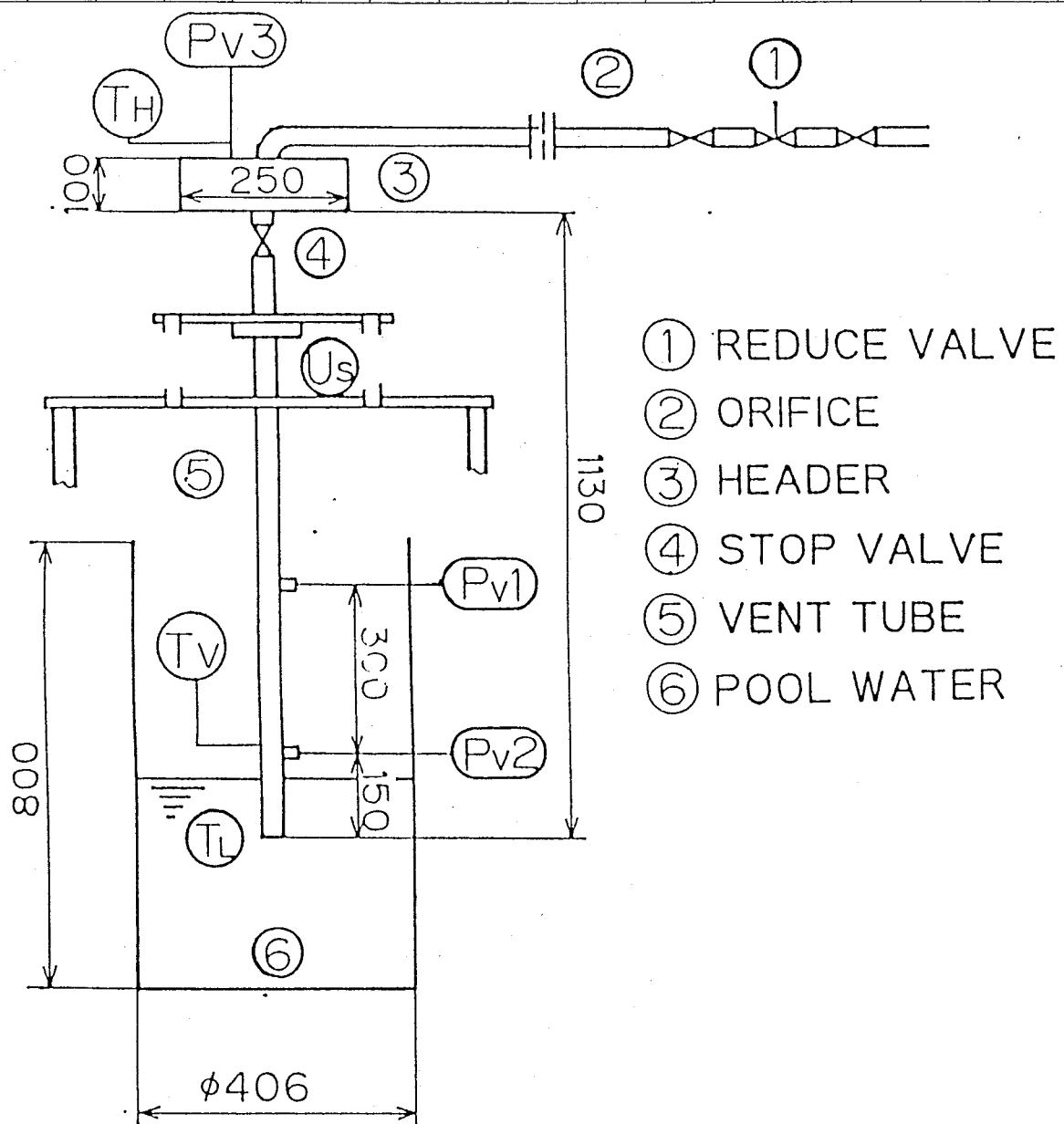


図 1-10 実験装置概略図



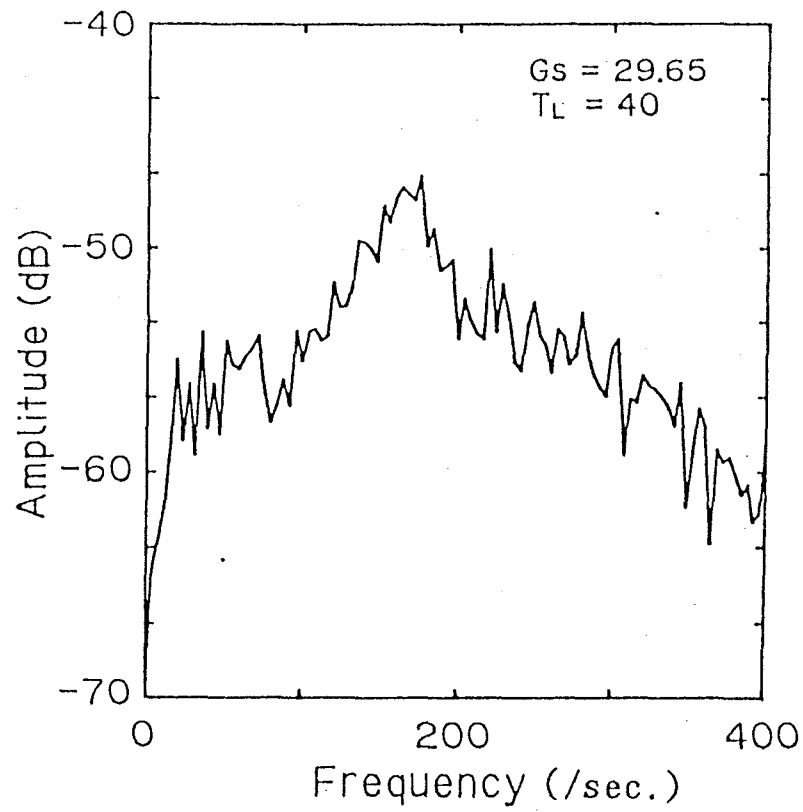
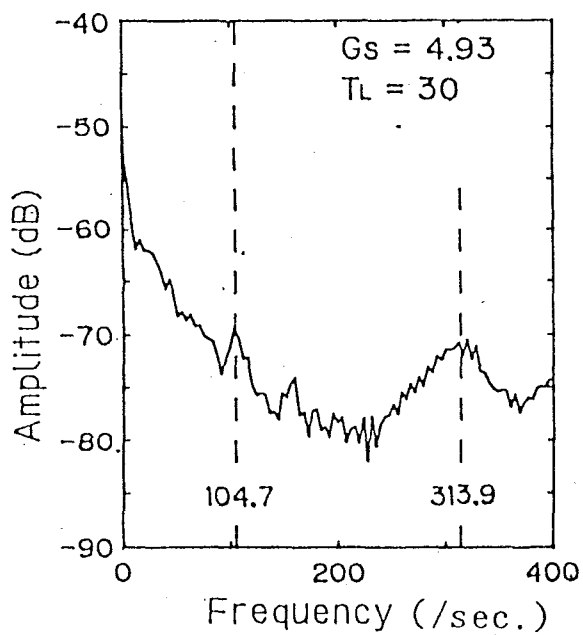
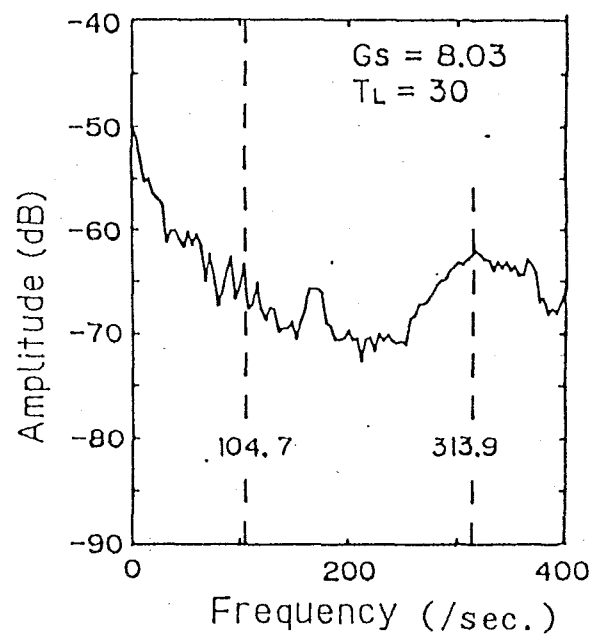


図 1-11 CO 領域の卓越周波数



(1) 定常波



(2) COに似た周波数成分

図 1-12 チャギング領域の卓越周波数

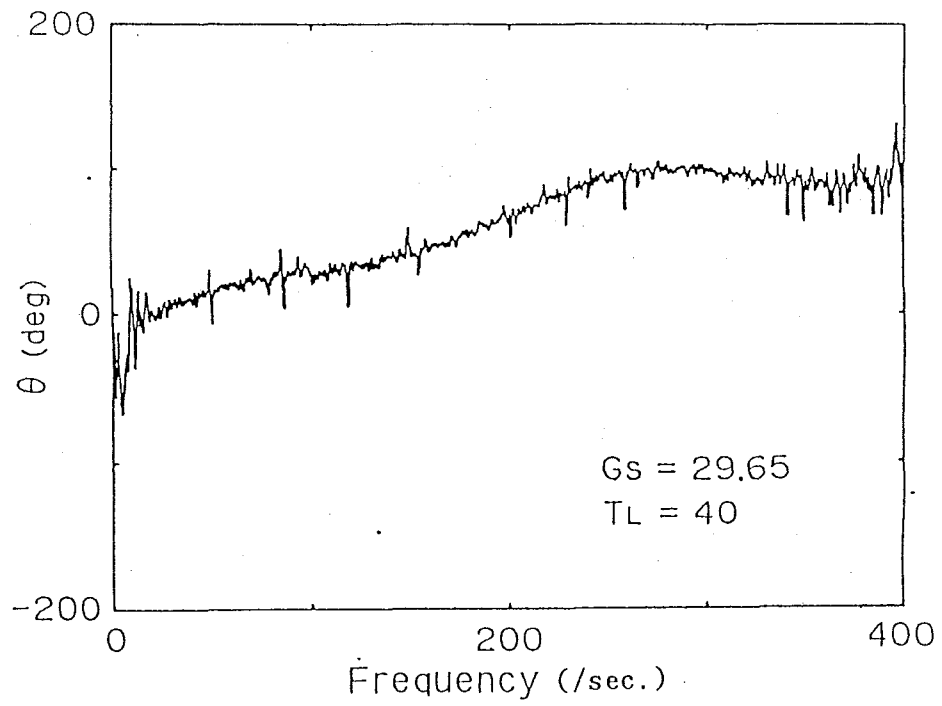


図 1-13 CO 領域の位相差

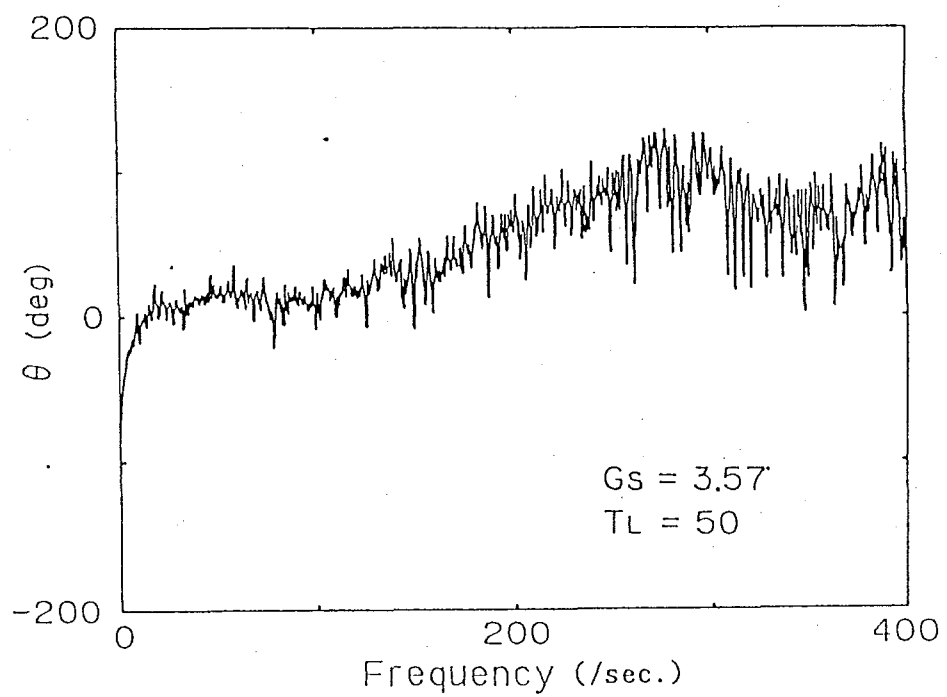
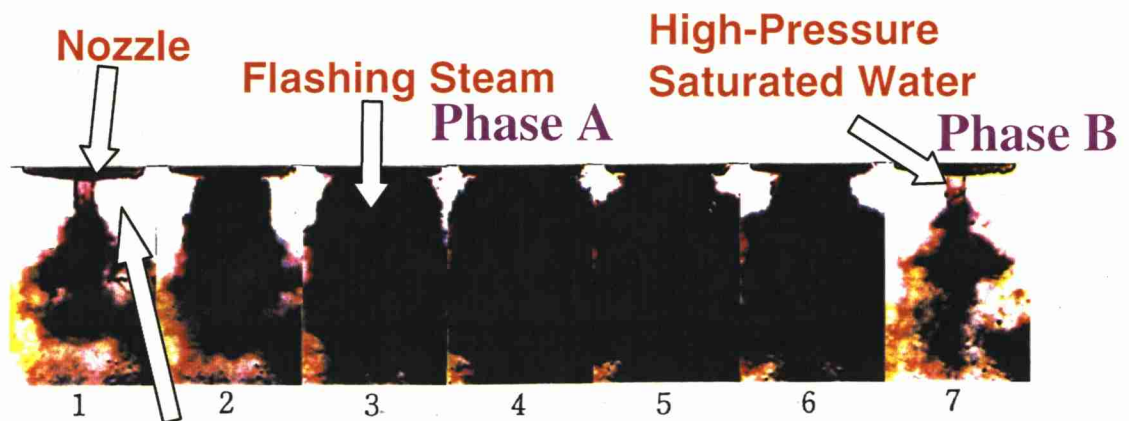


図 1-14 チャギング領域の位相差



## Pool Water

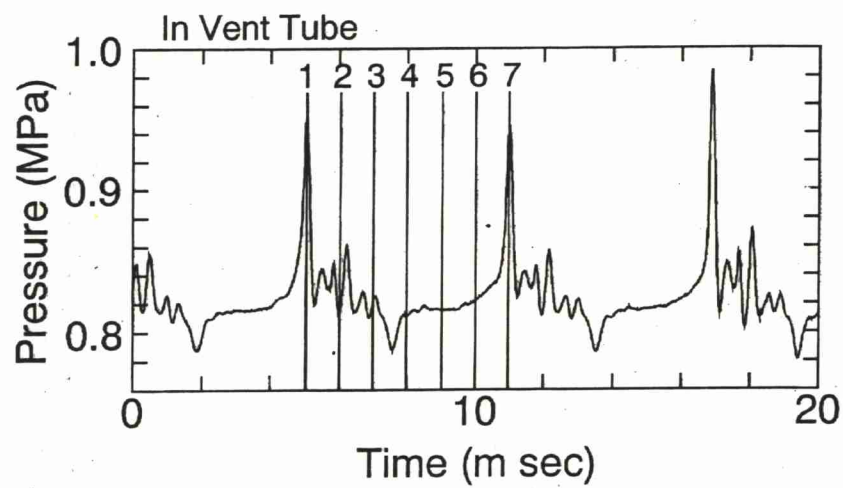


図 1-15. フラッシング現象とベント管内圧力の対応

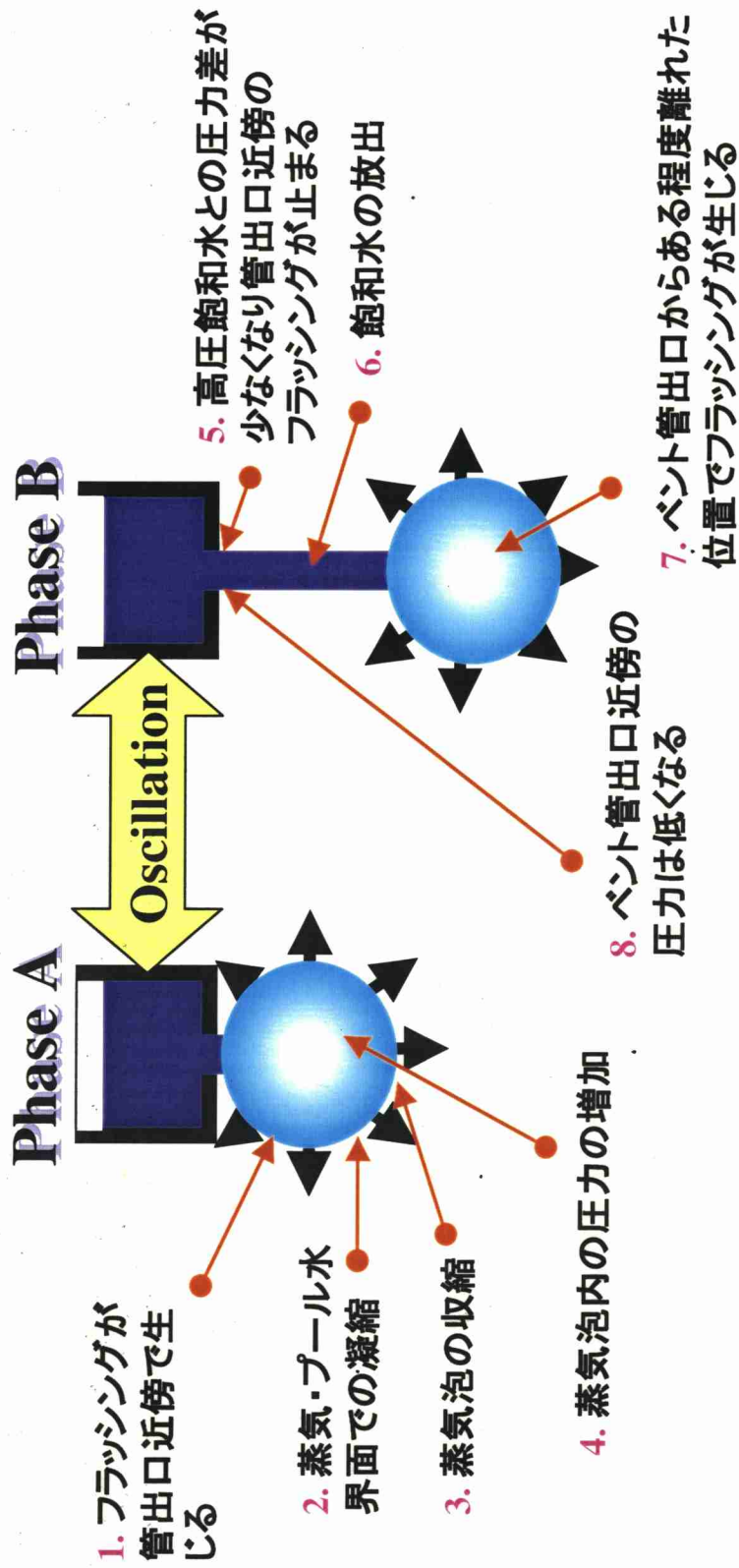


図 1-16 フラッシング振動の過程

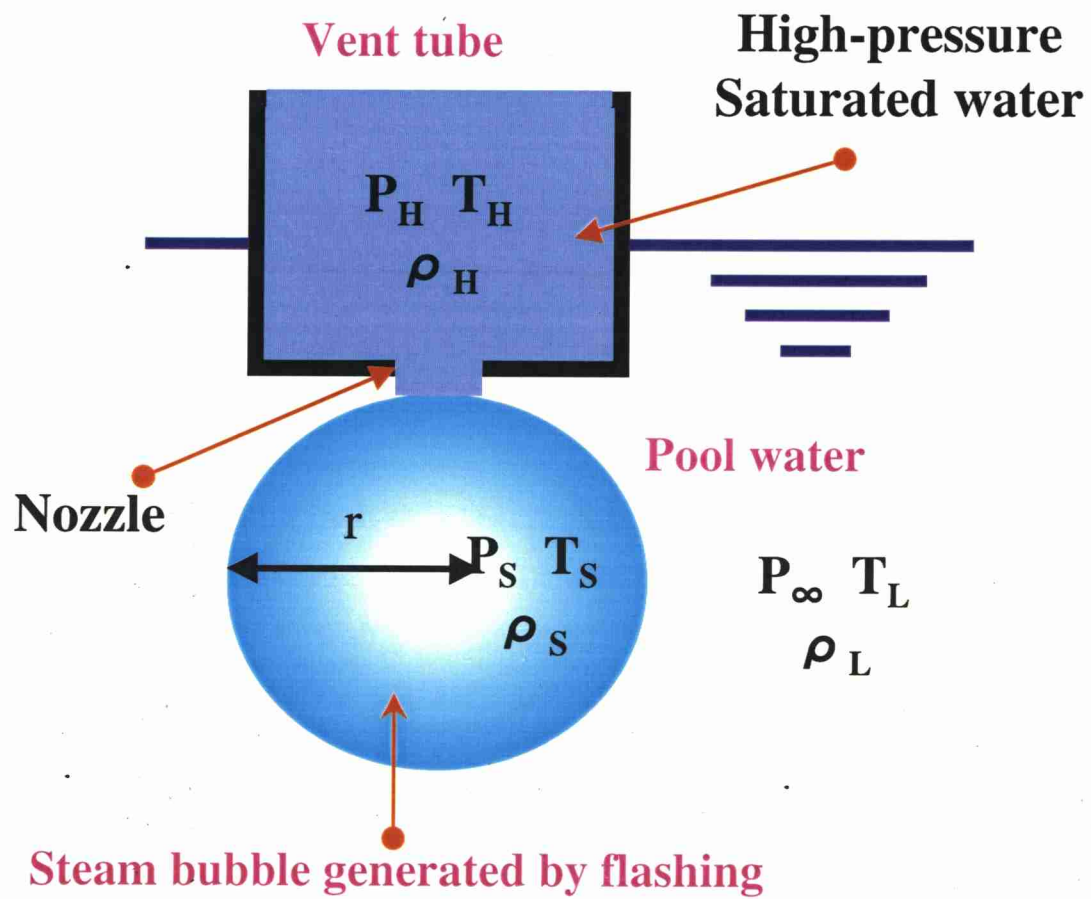


図 1-17 球状蒸気泡モデル

## 第 2 章 実験装置、及び解析方法

### 2.1 実験装置

本研究で用いた実験装置の概略を図 2-1 に示す。本装置は、圧力容器を模擬する  $0.2 \text{ m}^3$  の高圧飽和水タンクと水張り式格納容器を模擬する  $0.075 \text{ m}^3$  のプール水タンク及びこれらを結ぶ内径 21 mm、長さ 1.4 m のベント管からなっている。ベント管の先端には、放出孔の開いた直径 4, 5, 6 mm、厚さ 1, 3.8, 10 mm の孔をあけたキャップが被せられている。放出孔径、放出ノズル長さの変更はこのキャップの交換によって行われる(図 2-2)。また、ベント管先端部には放出方向切り替えノズルを取り付けることによって放出方向を鉛直下向きと横向きに替えることができる(図 2-3)。

高圧タンクは、内径 450 mm、高さ 1050 mm の軟鉄製で、上部は圧力計、安全弁、エア抜き弁が取り付けられている。また周囲は、グラスウールで断熱されている。プール水タンクは上部大気開放型の内径 406 mm、高さ 800 mm の軟鉄製容器であり、側面 2 面の一部は高速度ビデオカメラ撮影及び光源用にアクリル製の窓(150 mm×620 mm×10 mm)が設けられている。鉛直下方に向いたベント管よりプール水タンクに吹き込まれる飽和水のフラッシング・凝縮現象は、このアクリル窓より毎秒 2,000 コマのビデオカメラによって撮影される。プール水中とベント管の圧力と温度は、それぞれ圧力変換器と熱電対によって測定される。飽和水流量はベント管途中に設けられた電磁流量計によって測定される。圧力信号は FFT アナライザーによって記録・解析され、温度はペンレコーダーによって測定記録される。また圧力・温度信号及びビデオ映像は、同期信号によって同期されている。計測装置の構成図を図 2-4 に示す。

### 2.2 実験・解析方法

#### 2.2-1 実験方法

高圧タンクの圧力とプール水タンクの水を所定の値にする。圧力センサの焼き付け防止のために冷却水を流す。高速度ビデオカメラとペンレコ

ーダをスタートさせ、その後にバルブを開けてフラッシングさせる。数秒後、トリガをかけて全ての計測装置で同時に計測する。

本実験におけるパラメータは、高圧タンクの圧力が 0.3～0.9 MPa の 7 種類、プール水タンクのプール水温が 20～70℃ の 6 種類、放出孔径が 4, 5, 6 mm の 3 種類と放出孔長さが 1, 3.8, 10 mm の 3 種類である。

## 2. 2 - 2 解析方法

本実験ではベント管出口とプール水タンク内に設置した 2 ヶ所の圧力変化と電磁流量計からの流量が計測項目である。圧力波形は直流電圧の変化として FFT アナライザ(CF6400)へ取り込まれ、内蔵の FDD でフロッピーディスクに記録される。FFT アナライザではそれらを読み出し解析処理する。圧力の時間軸波形から周波数特性、各圧力波の位相差を調べることにより卓越周波数が求められ高速度ビデオカメラで撮影した画像との関係を調べる。流量は電磁流量変換器に取り付けられているデジタル表示計により平均流量が計測できる。

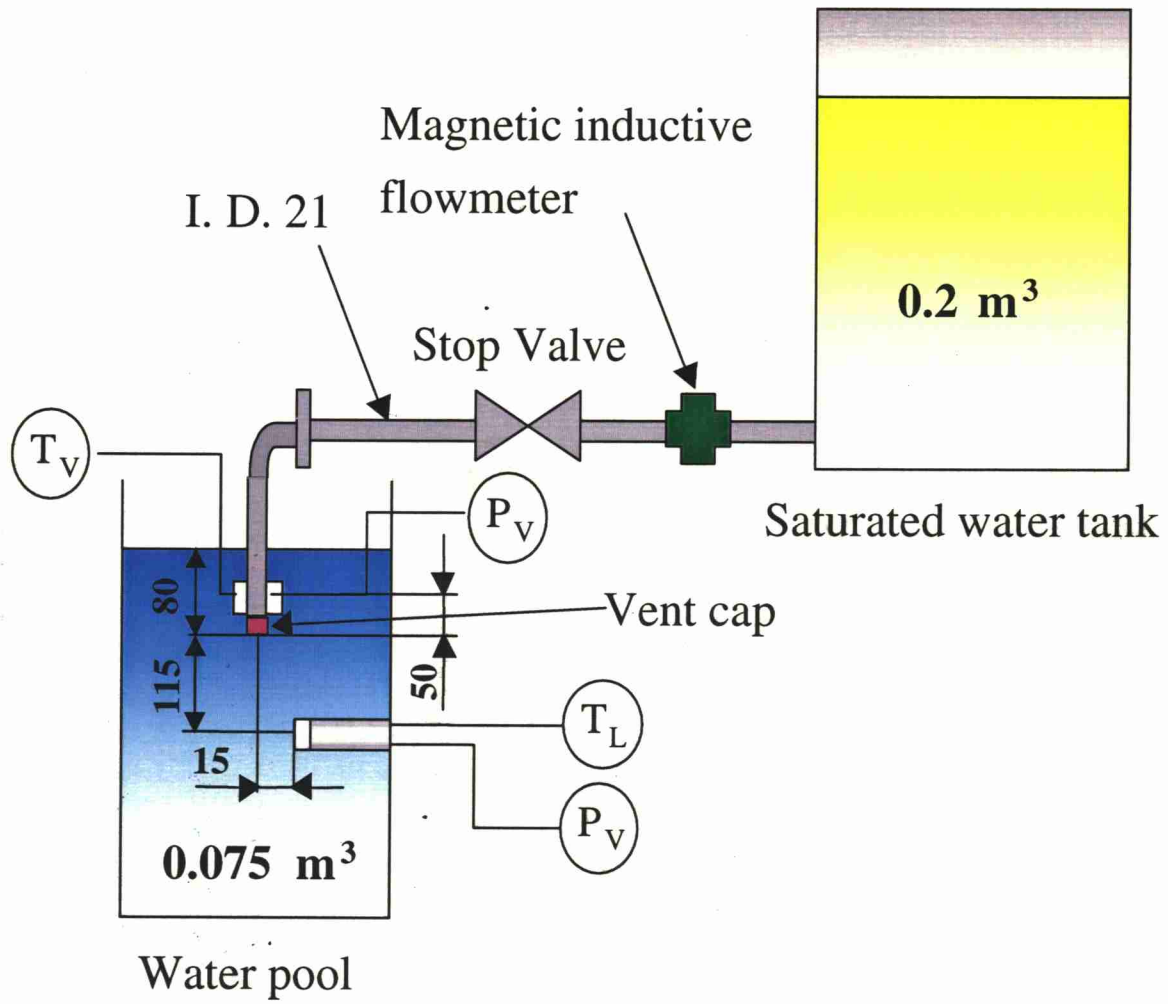


図 2-1 実験装置



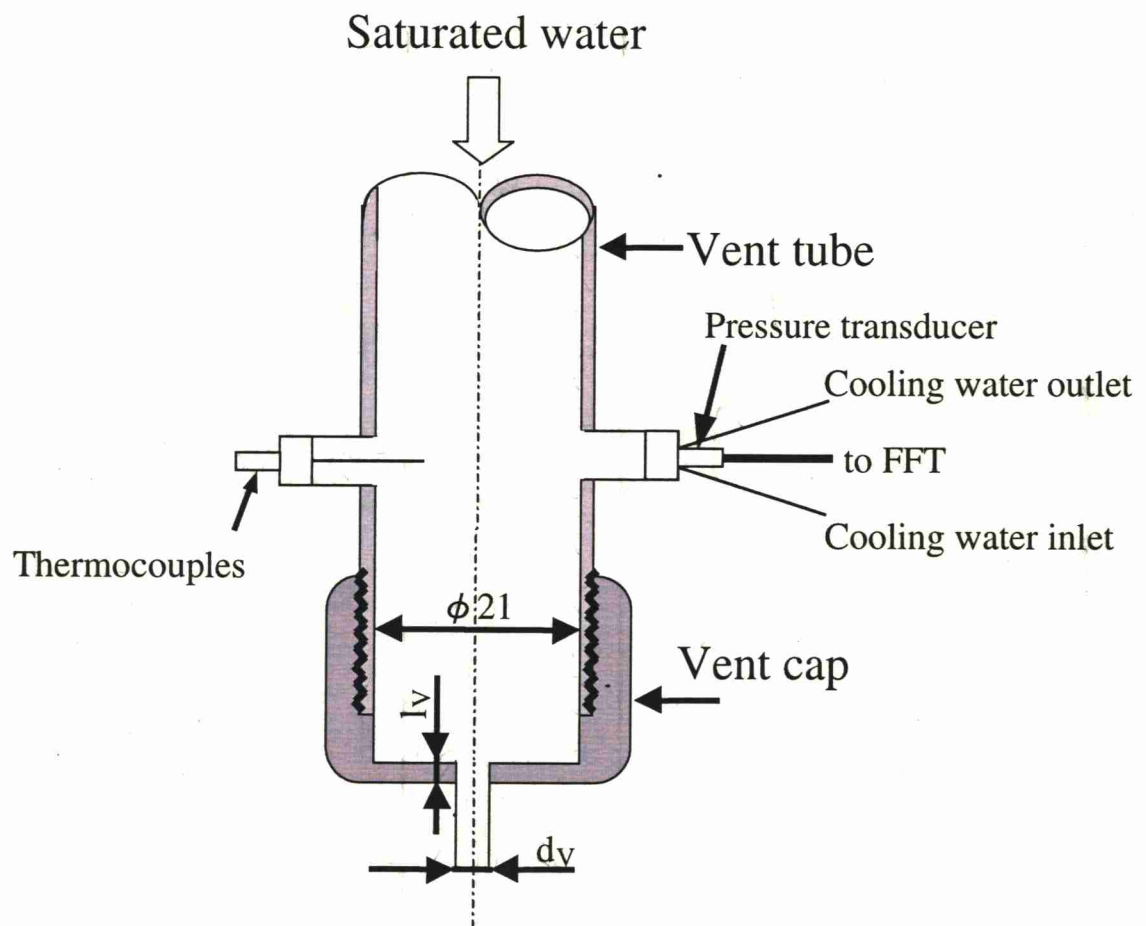


図 2-2 ベント管先端部

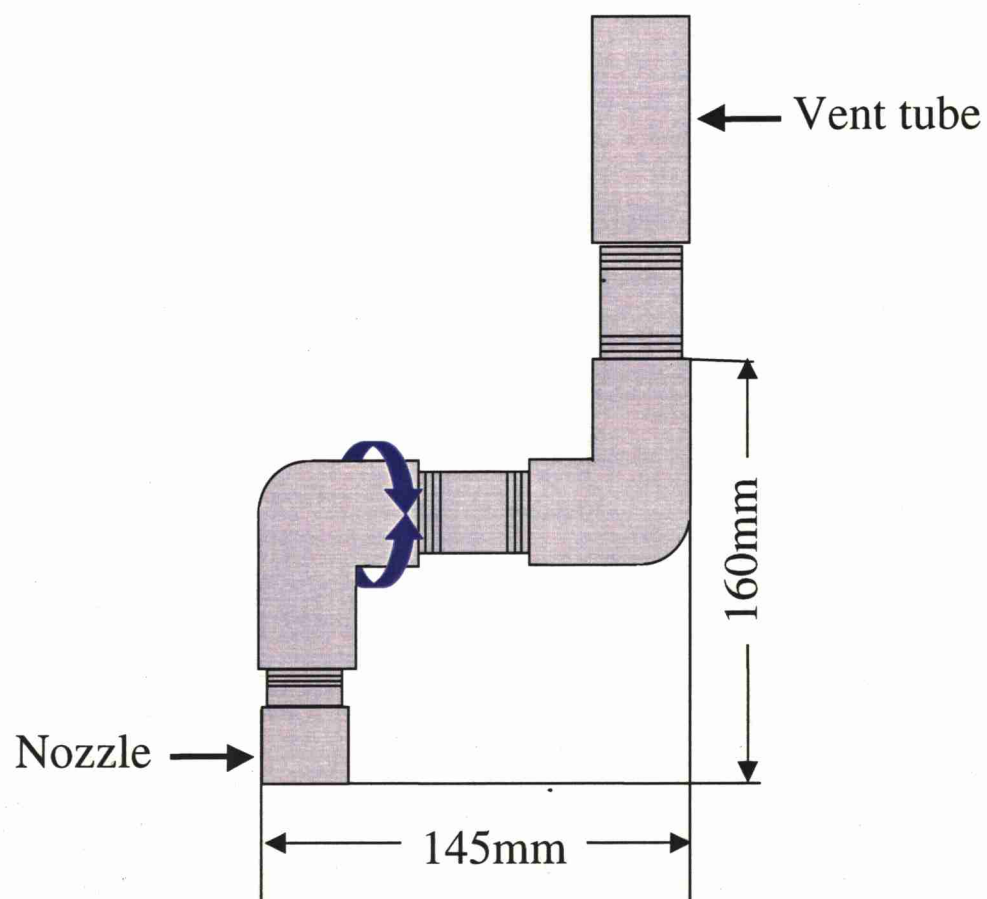


図 2-3 放出方向切り替えノズル

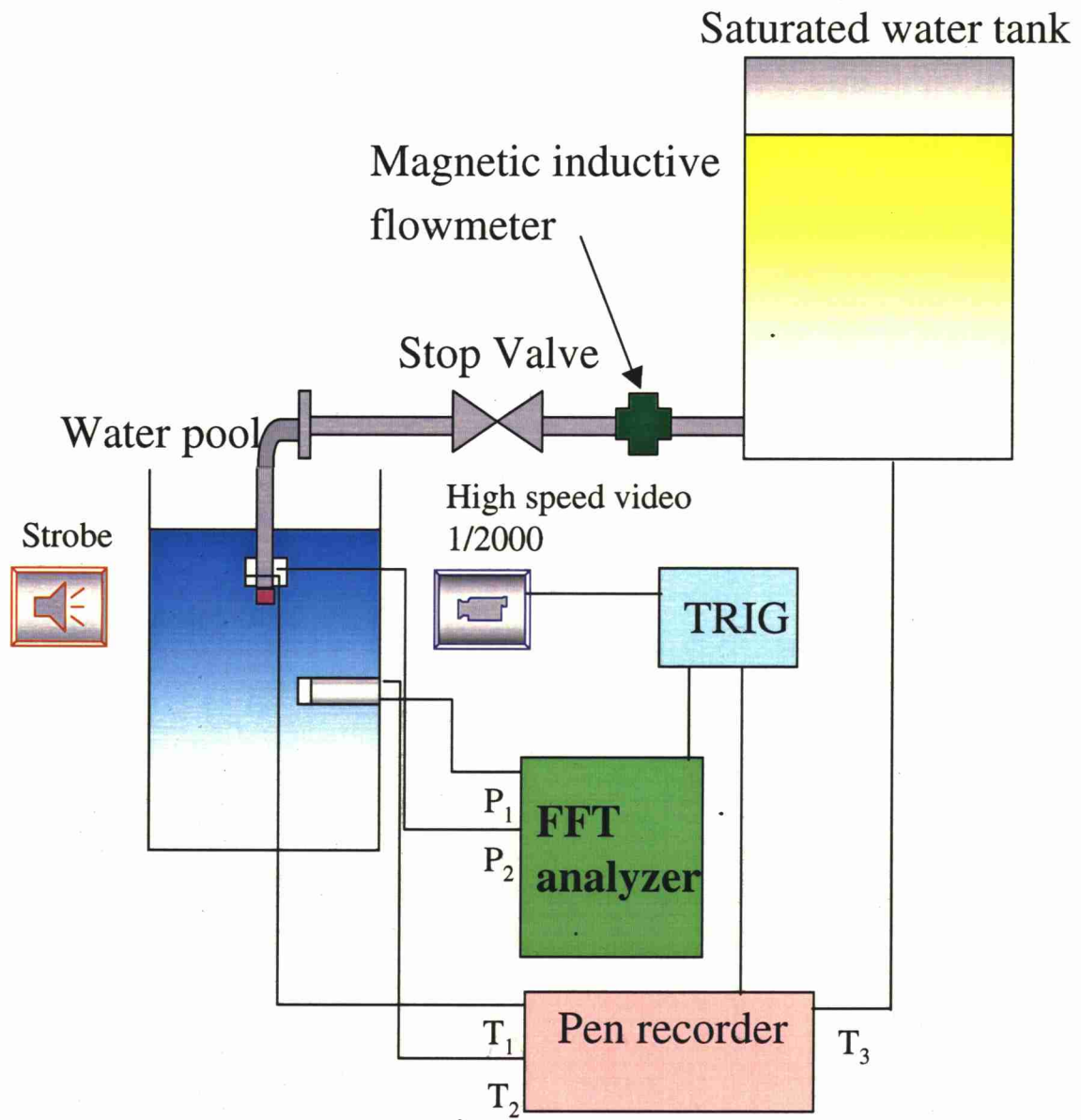


圖 2-4 計測裝置

## 第3章 実験結果と考察

### 3.1 FO 周波数マップ

図 3-1 は、高圧飽和水圧力とサブクール度の影響について、それぞれ放出孔径、放出ノズル長さ別に整理したものである。これらの図より、サブクール度の増加と放出孔径、放出ノズル長さ及び放出飽和水圧力の減少につれて FO の周波数  $\nu$  は増加していることが分かる。さらに、サブクール度、放出孔径、放出ノズル長さ及び放出飽和水圧力の各パラメータの FO 周波数への影響について、式(1.23)に放出ノズル長さの影響も加え実験結果を最小 2 乗法を用いて整理する。その結果、

$$\nu = 0.67 \frac{\Delta T^{0.75}}{d_v^{1.12} P_H^{0.27} l_v^{0.04}} \quad (3.1)$$

を得た。式(3.1)において放出飽和水圧力(Pa)、放出孔径(m)、放出ノズル長さ(m)及びサブクール度(K)の単位を用いた。図 3-1 における実線は式(3.1)を表している。式(3.1)に示されるように FO の周波数に及ぼす放出ノズル長さ  $l_v$  の影響は小さいことが分かる。そして各係数から実験式(3.1)は、理論式(1.23)に近づいており、理論式の妥当性が明らかになった。

### 3.2 マップ作成方法と現象マップ

#### 3.2-1 マップ作成方法

画像により判断できるフラッシング・凝縮現象について以下に示す。

##### (1) Flashing (Phase A)

放出孔付近でフラッシングするままで FO を生じない。凝縮する蒸気界面の振動が少なく、圧力振動もない(図 3-2)。

##### (2) Flashing Oscillation (FO)

Phase A と Phase B (飽和水のまま放出され、放出孔よりある程度離れた部分でフラッシングする) の繰り返し現象。圧力振動を生じそのピークは Phase B と同期する(図 3-3)。

### (3) Transition Region : TR

(1)と(2)の間(図 3-4)もしくは(2)と飽和水放出（フラッシングを全く生じない飽和水の放出）の中間様式(図 3-5)。

この各項目において、放出飽和水圧力、プール水温度、放出孔径、及び放出ノズル長さの変化でフラッシング凝縮振動現象が、どう移り変わっていくか調べ、放出孔径、放出ノズル長さ別に現象様式マップを作成する。

### 3.2-2 現象マップ

図 3-6 は、高圧飽和水をプール水中に放出したとき、放出飽和水圧力、サブクール度、放出孔径及び放出ノズル長さの影響で流動現象がどう移り変わっていくかを、放出孔径及び放出ノズル長さ別に示したものである。これらの図より、フラッシングは、放出飽和水圧力と放出孔径が大きくなるにつれ、またプール水のサブクール度が小さくなるにつれ生じやすくなることが分かる。従って、フラッシングを生じる平均位置はより管出口に近づき、管出口からある程度離れた位置で生じることが少なくなる。このことは、放出飽和水圧力と放出孔径が大きくなるにつれ、またプール水のサブクール度が小さくなるにつれ Phase B が現れなくなり Phase A のみのフラッシングになること、すなわち Phase A と Phase B を繰り返す現象である FO は生じないことを示している。またノズルから空気中へ飽和水を放出する際のフラッシング研究によれば、ノズル内の気泡成長は流量圧力変化によって時間遅れが生じるものの、基本的にはノズルの長さによって支配されノズルが長いほどノズル内でフラッシングする量は多くなる。従って、ノズル長さが大きくなれば、プール水中のフラッシングにおいても Phase A のフラッシングが生じやすくなり、FO は生じにくくなる。これらの傾向は、本研究で得られたこれらのマップに良く表されている。ちなみに実験式(3.1)は、マップの中の FO 領域の圧力卓越振動数について整理されている。

### 3.3 FO 周波数に及ぼす放出方向の影響

図 3-7 は高圧飽和水をプール水中に放出したとき、FO 周波数に及ぼす放出方向の影響を放出孔径で整理したものである。このグラフからもわかるように FO 周波数に及ぼす放出方向の影響はほとんどない。すなわち FO 現象は、重力の方向に影響を受けないことが言える。

### 3.4 プール水中に放出される高圧飽和水流量

前述のように高圧飽和水をプール水中に放出したときのフラッシング・凝縮現象は、ほぼ明らかになった。しかしながら、高圧飽和水がプール水中に放出された際の流量が放出飽和水圧力、プール水温度、ベント管の放出孔径、放出ノズル長さの各パラメータの影響によってどのように変化していくかは、明らかになっていない。ここでは高圧飽和水、もしくはフレオン 12 を大気中に放出し、その流量結果を整理した他の研究者の実験式と本研究で得られた流量の実測値を比較した。

図 3-8 は、高圧飽和水をプール水中に放出したときの流量測定結果をあらわしている。図中の実線は高圧飽和水を大気中に放出した Bailey らの実験式(1.1)をあらわしている。この図より本実験で得られた流量結果は、プール水のサブクール度の違いによって流れる流量に若干の違いがあるが、Bailey らの実験式に比較的良く一致することがわかる。

図 3-9 は、Bailey らの実験式(1.1)と全流量測定結果を比較している。図 3-10 は、Benjamin らの実験式(1.3)と全流量測定結果を比較している。図 3-11 は、Pasqua の実験式(1.5)と全流量測定結果を比較している。図 3-12 は、Hayamizu らの実験式(1.8)と全流量測定結果を比較している。これらの図より、放出孔径の 4, 5mm の小さい範囲ではこれらの実験式に比較的良く一致するが放出孔径が 6mm の場合は実験式と比較して小さくなっていることがわかる。Hayamizu らの実験においても放出孔径が大きくなるにつれ放出係数が小さくなる傾向がある。すなわち計算結果と比較して実測値の方が低い傾向にあることを示している。このことは本実験で得られた全流量測定結果と他の研究者の実験式と比較しても同じ事が言える。

放出飽和水圧力、及びサブクール度によって多少の変動があるが、全て

の流量の測定結果は、Bailey の実験式に $\pm 20\%$ 以内で一致している(図 3-11)。このようにプール水中に放出された高圧飽和水の流量が気中に放出されたときの実験式と良く合うということは、基本的に出口側の圧力変動に流量が影響されていることが少ないことを示している。

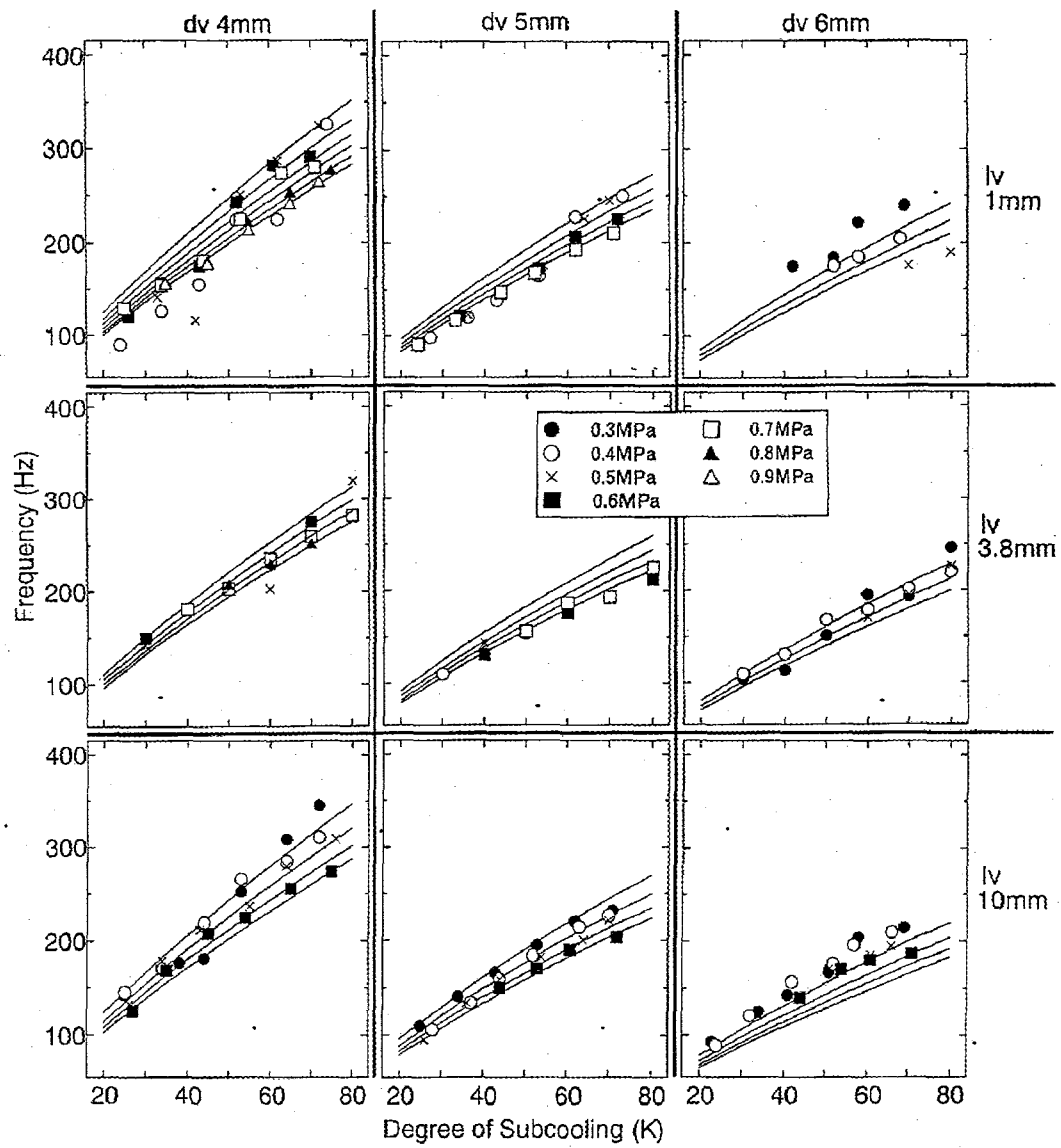


図 3-1 FO周波数マップ



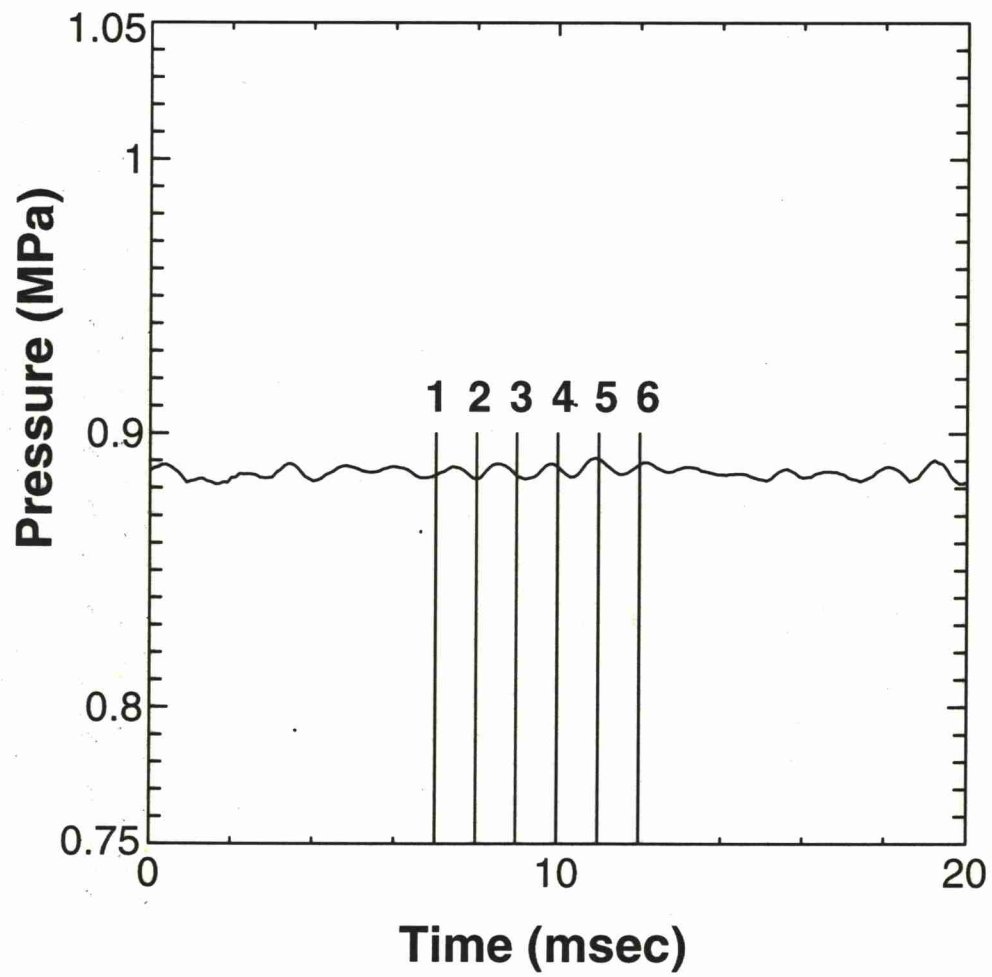
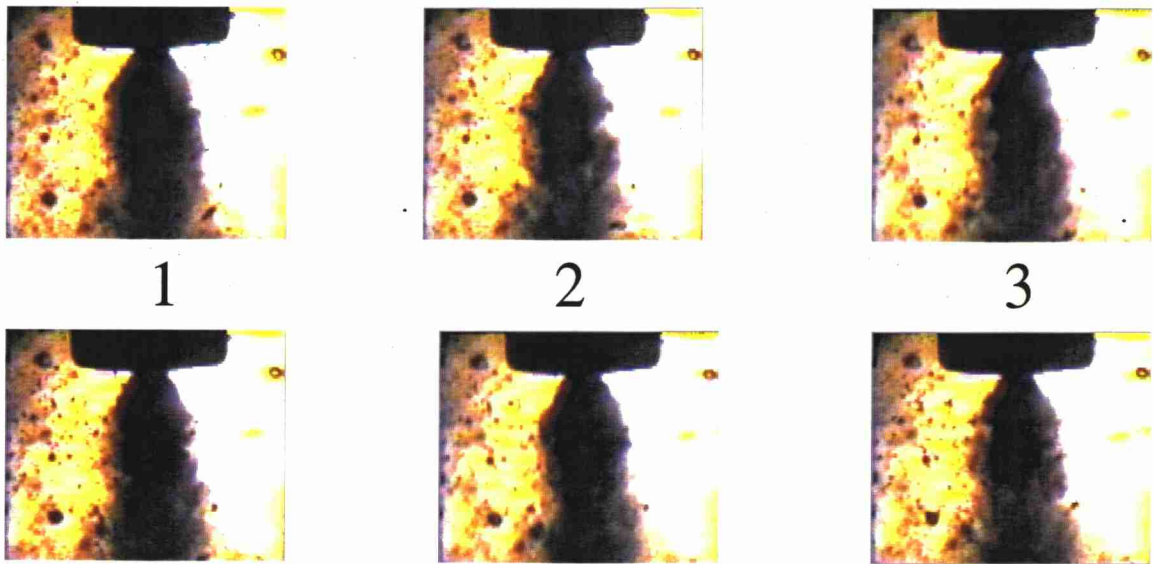


図 3-2 Flashing (Phase A)

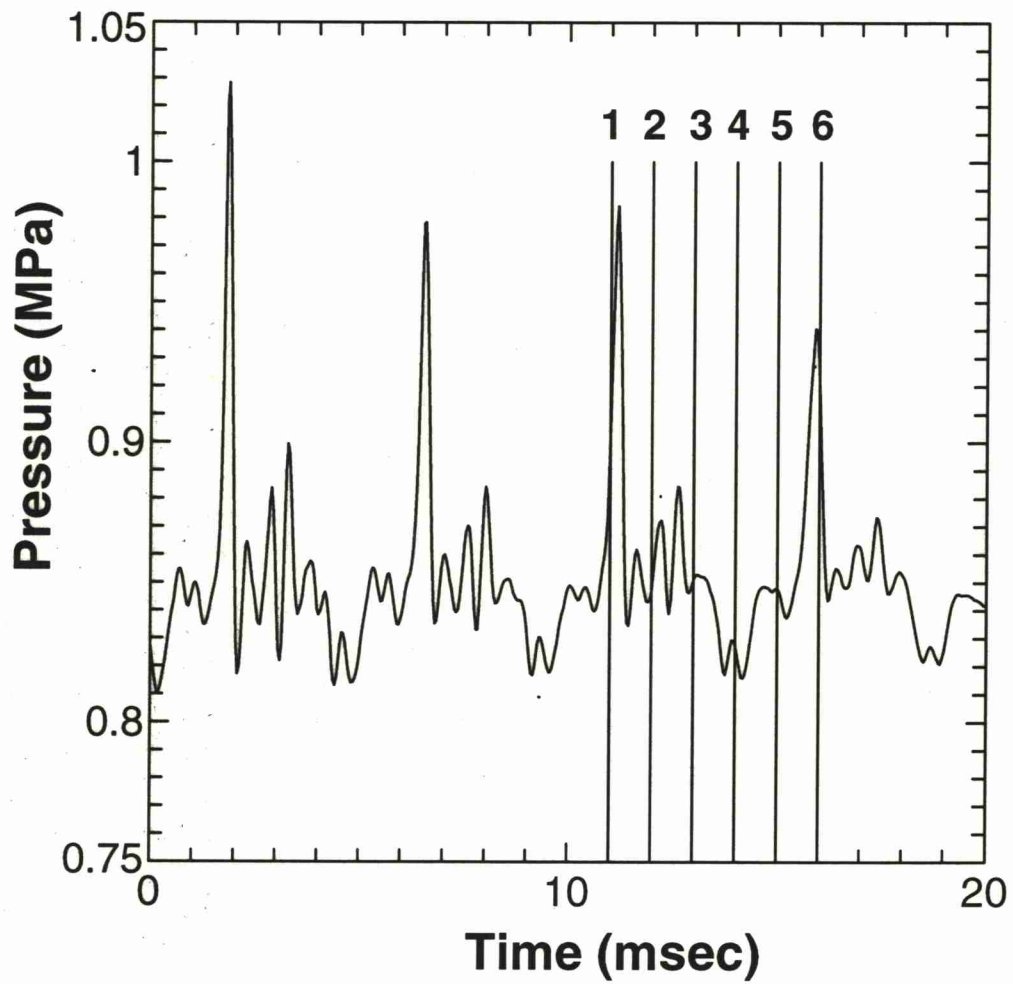
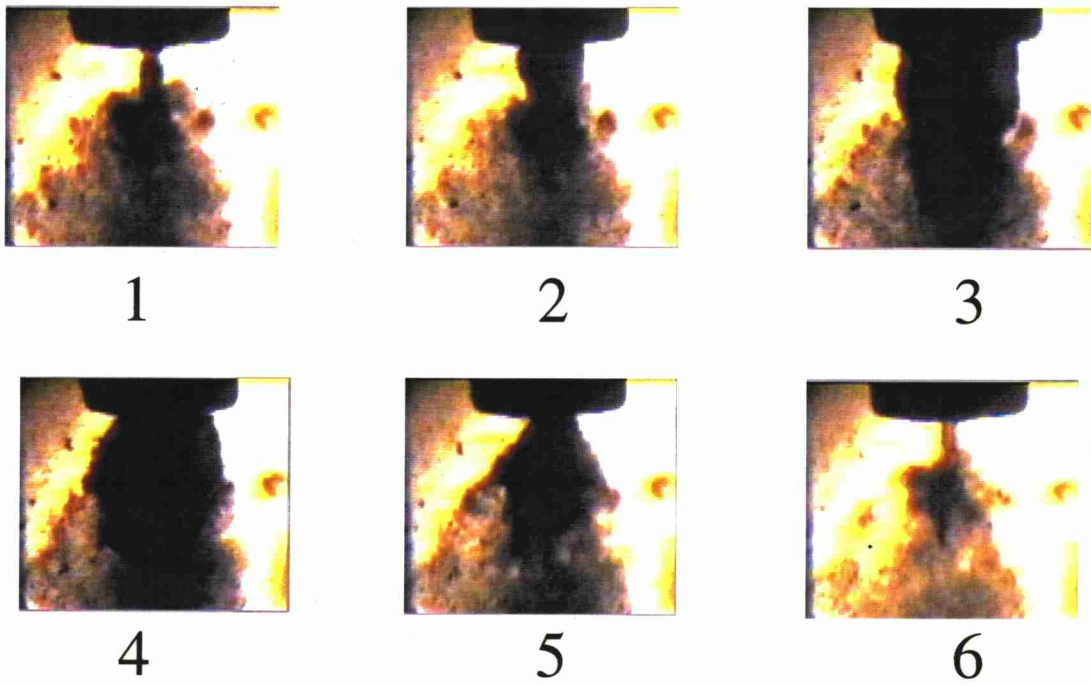


図 3-3 Flashing Oscillation(FO)

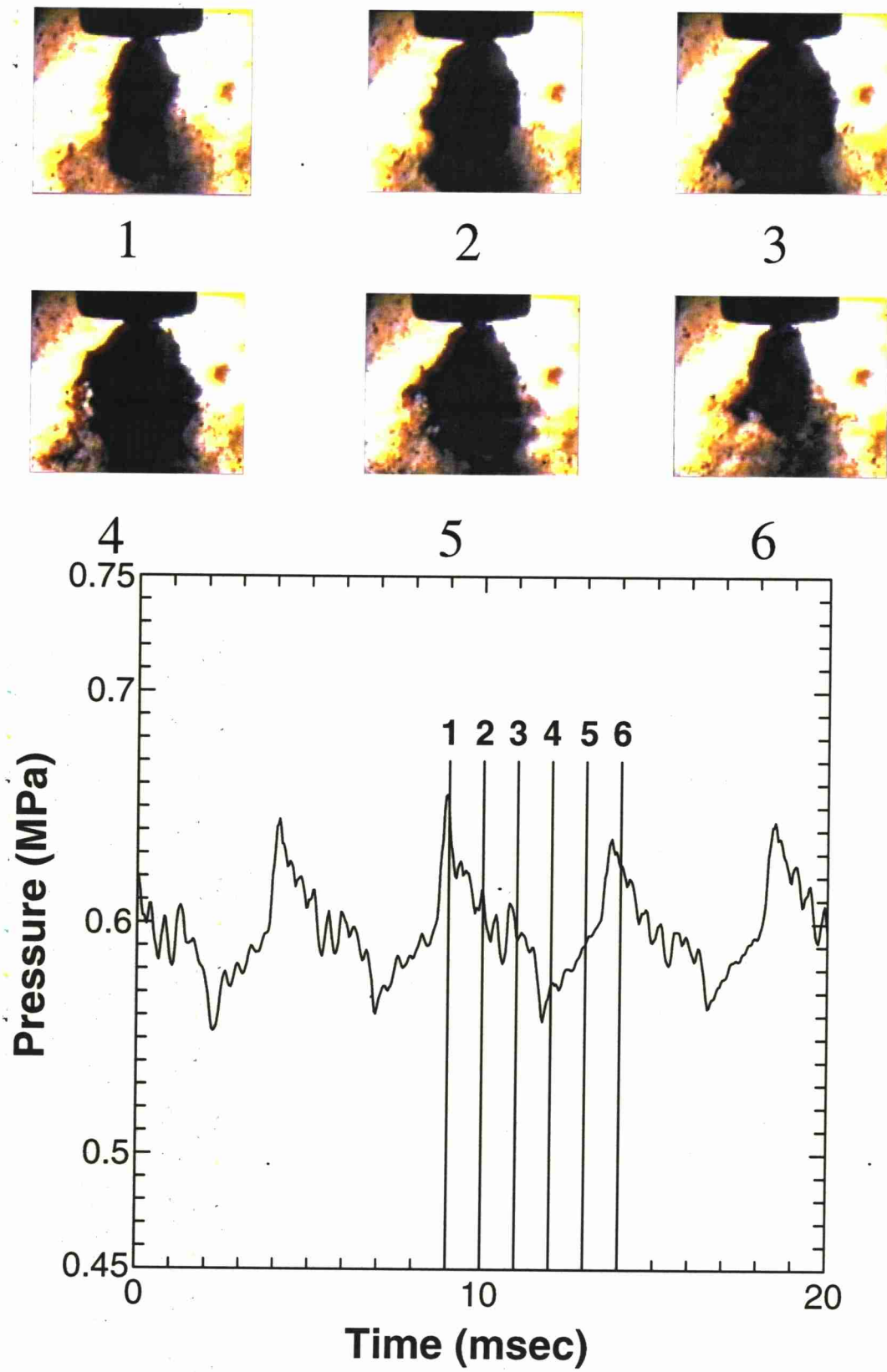


図 3-4 Transition Region (TR, FOとFの間)

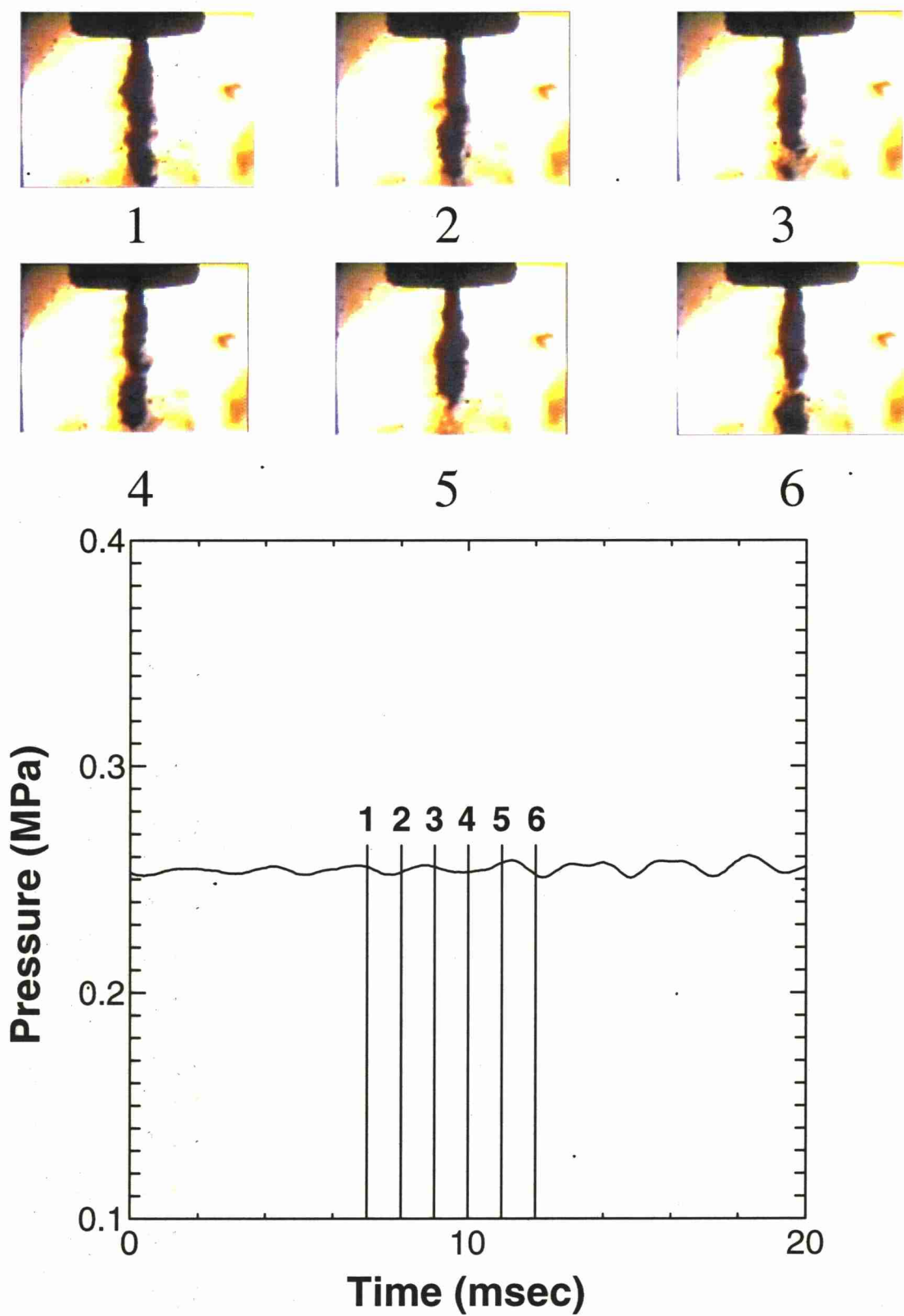


図 3-5. Transition Region (TR, FOと飽和水の放出の間)

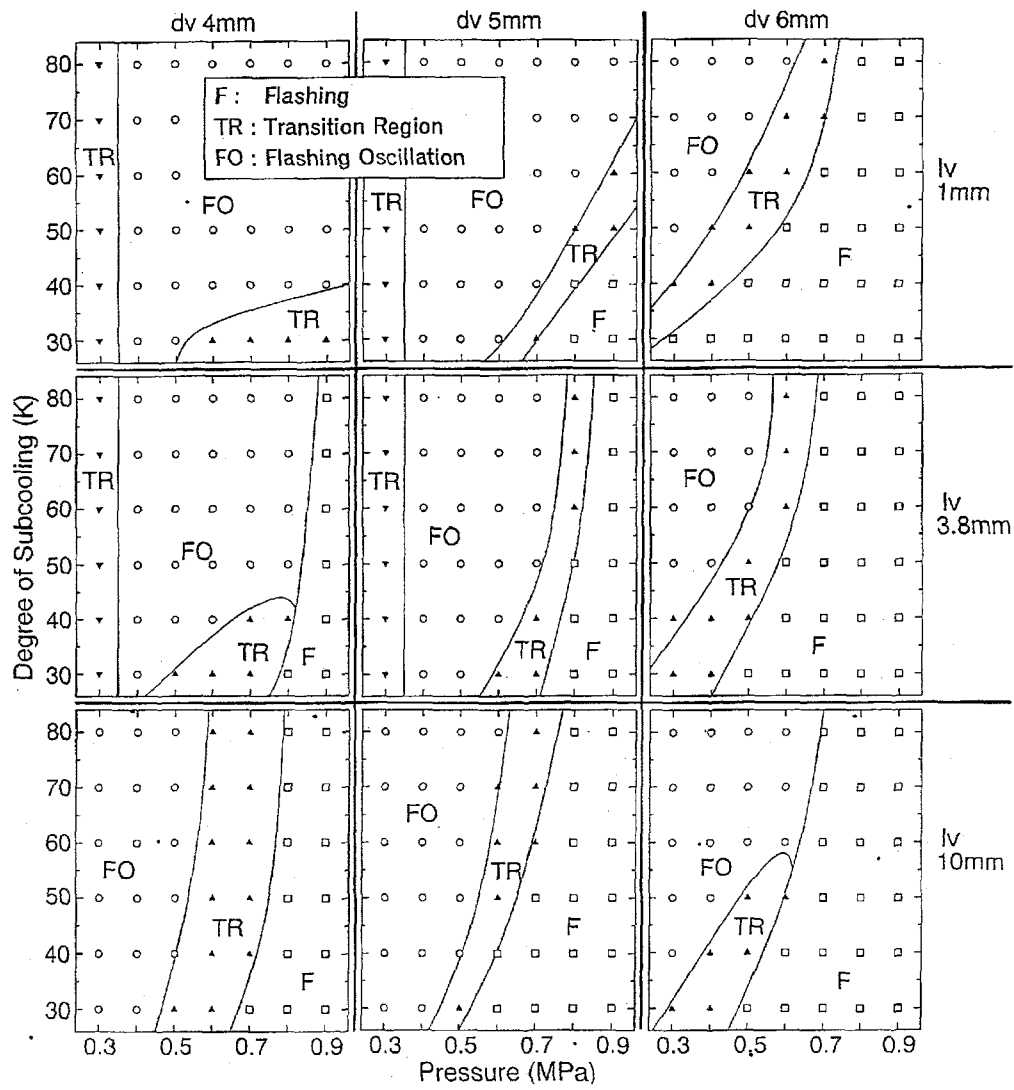


図 3-6 現象マップ

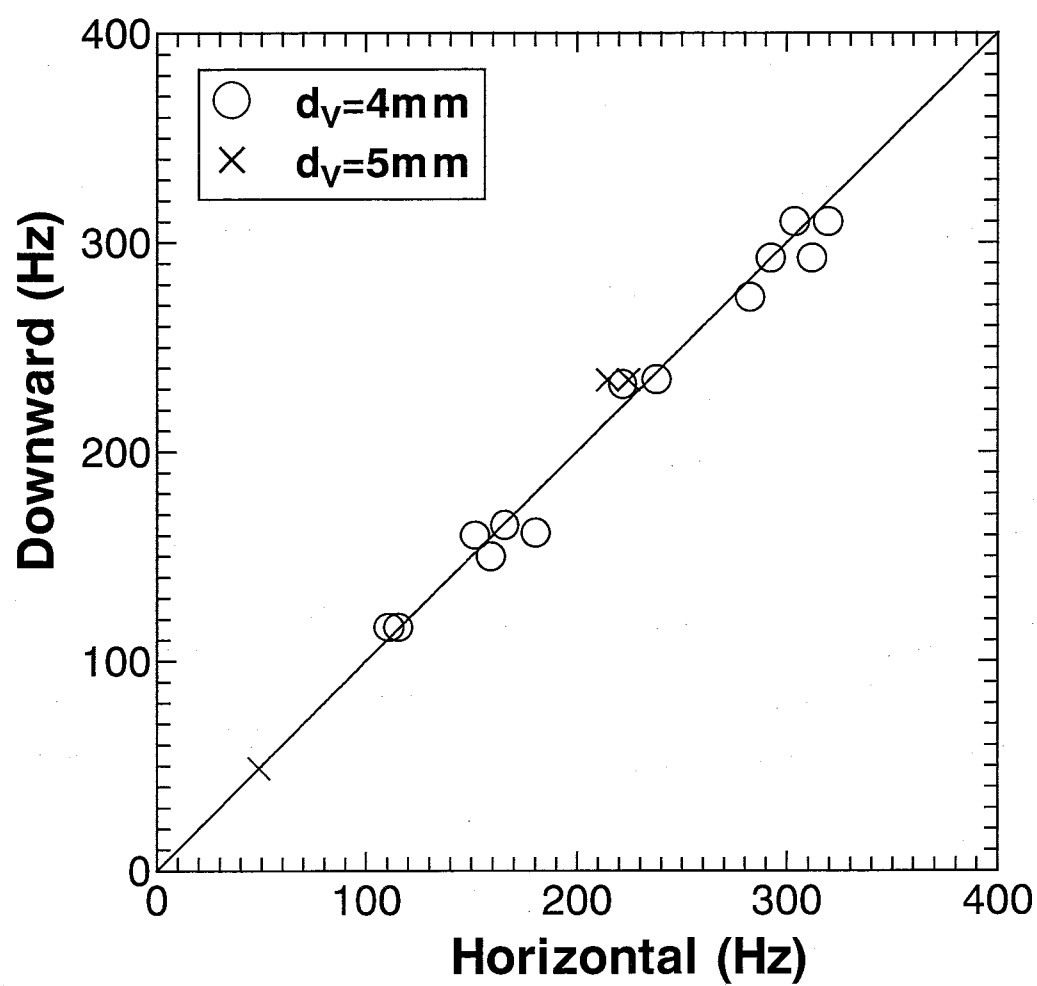


図 3-7 FO周波数に及ぼす放出方向の影響

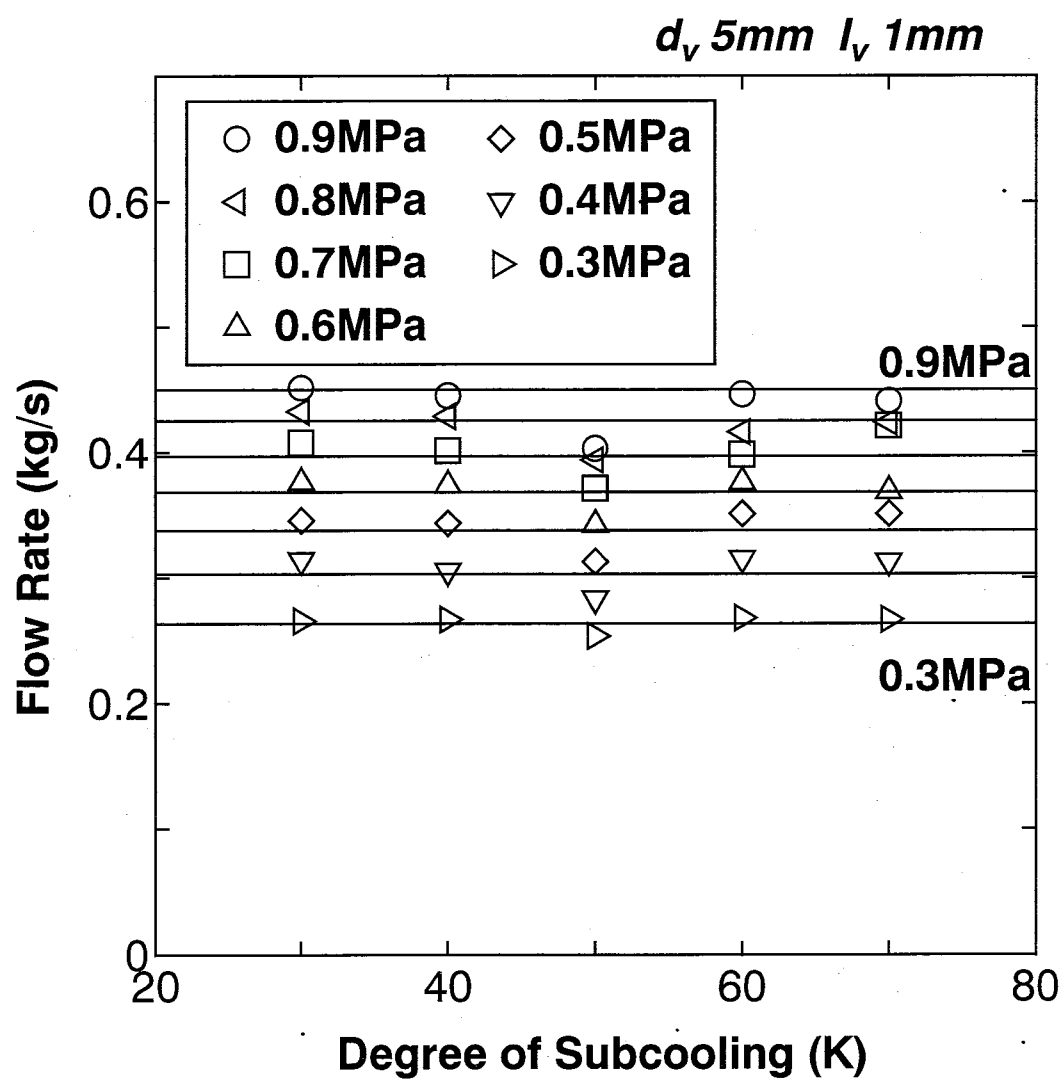


図 3-8 流量測定結果

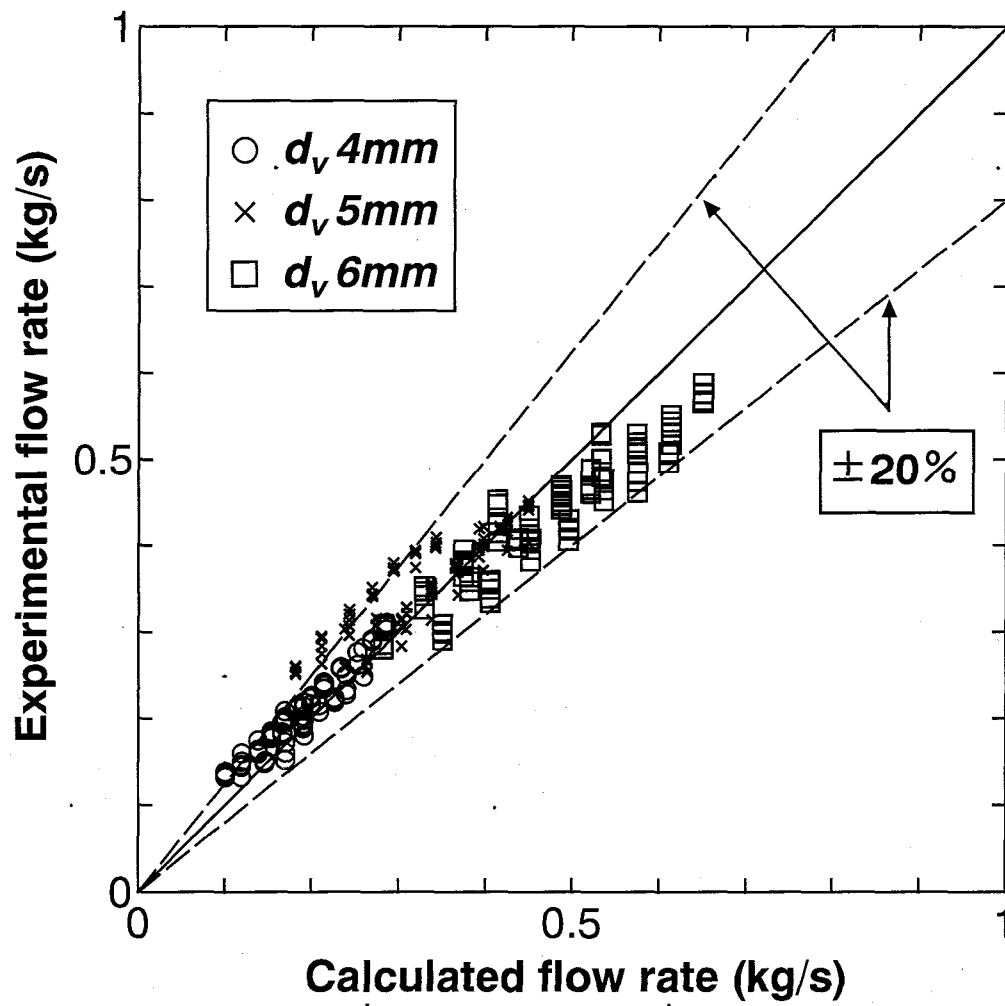


図 3-9 Baileyの実験式と計測値の比較



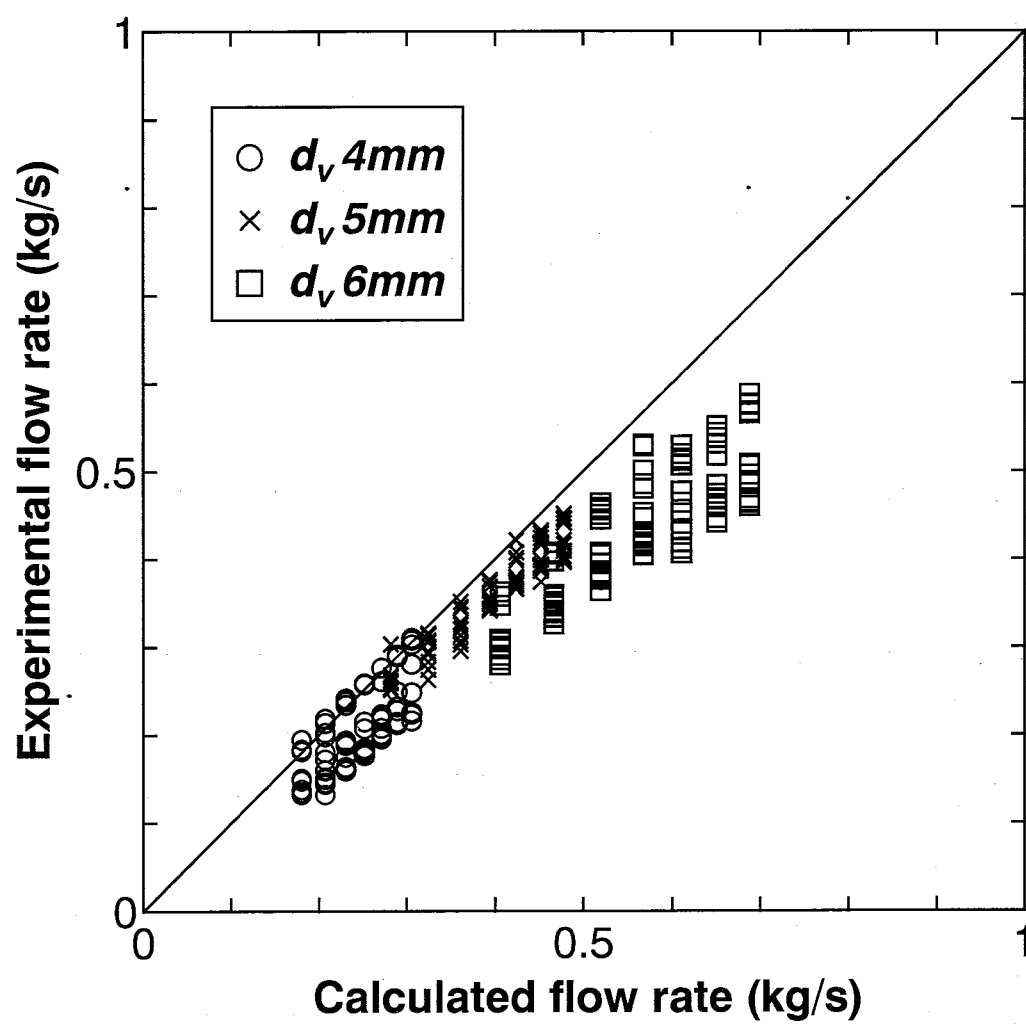


図 3-10 Benjaminの実験式と計測値の比較

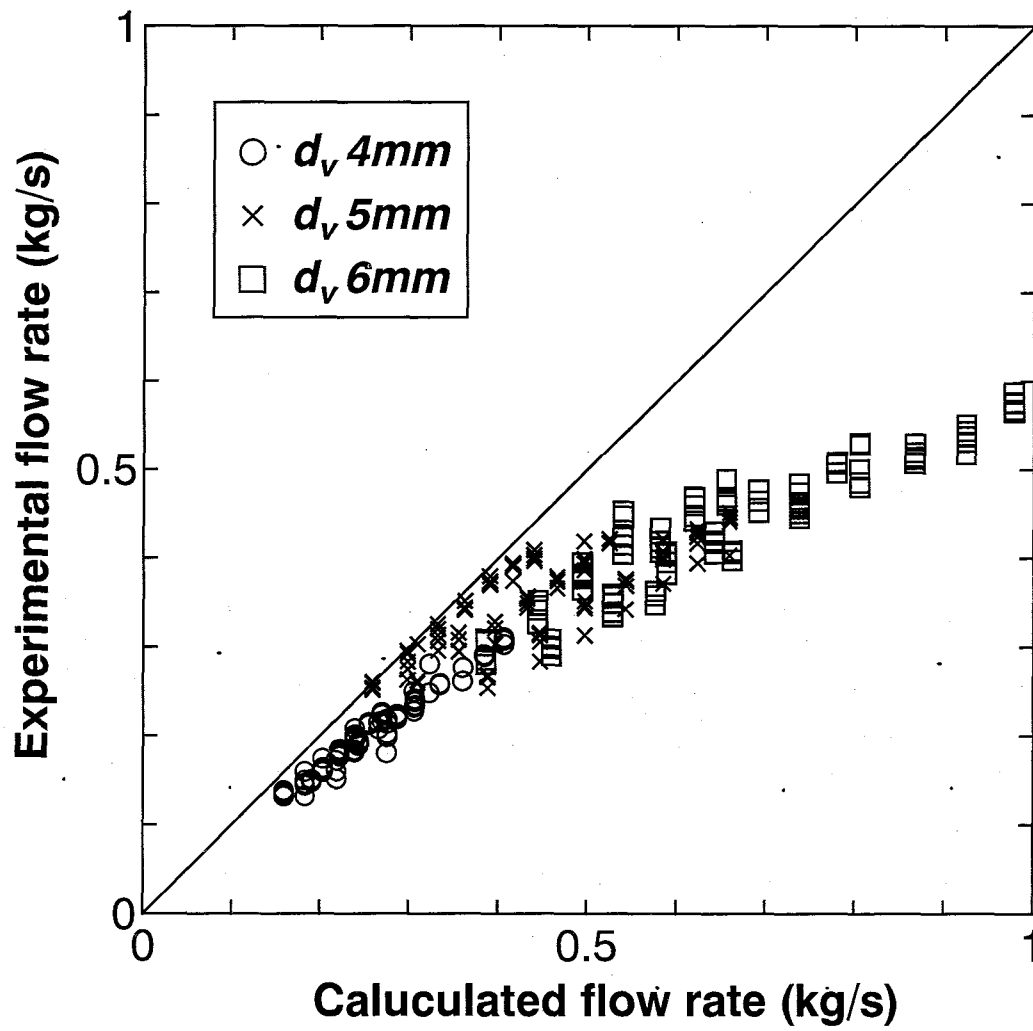


図 3-11 Pasquaの実験式と計測値の比較

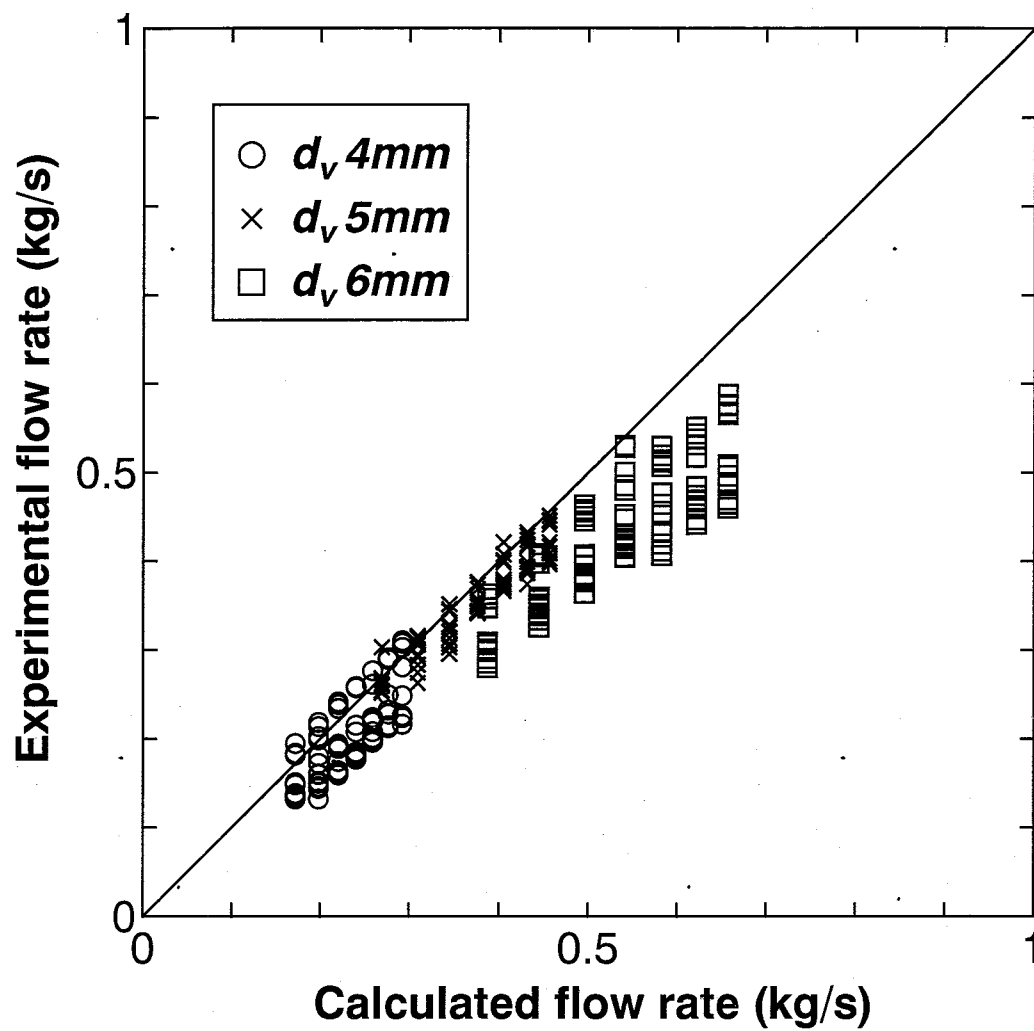


図 3-12 Hayamizuの実験式と計測値の比較

## 第4章 結論

本研究では、高圧飽和水をプール水中に放出する実験を行った。研究の目的は、原子炉の圧力容器・配管系の漏洩事故もしくは破断事故時の現象を評価するために、高圧飽和水をプール水中に放出し、放出飽和水圧力、プール水温度、ベント管の放出孔径、及び放出ノズル長さの各パラメータがプール水中のフラッシング・凝縮現象に及ぼす影響と高圧飽和水の流量を実験的に明らかにすることである。

実験結果をまとめると、以下のようなになる。

1. FO の周期に及ぼす放出ノズル長さの影響は小さく、従って FO の周期は基本的に気泡の凝縮運動によってのみ支配されるという線形解析の仮定が妥当である。そして、理論式により近い実験式が得られた。
2. 高圧飽和水圧力、放出孔径、放出ノズル長さの増加につれ、またプール水のサブクール度の減少につれ、Phase A のフラッシングが生じやすくなっている。
3. FO 周波数に及ぼす放出方向の影響はほとんどなく、FO 現象は重力の方向に影響を受けない。
4. 高圧飽和水がプール水中に放出される際の流量は、本実験範囲において Bailey の式に最も良く一致する。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、賞雅寛而教授には終始暖かいご指導を頂き感謝の念に耐えません。また国内外での学会に参加する機会を与えていただいて非常に有益な経験をさせて頂きました。重ねて感謝の意を表します。

倉林美積講師には実験装置の製作等、研究を遂行するに当たり便宜をはかって頂きました。深く感謝いたします。

多田恭祐助手には実験装置の製作研究を遂行するに当たり便宜をはかって頂いただけでなく息抜き等にもつきあって頂き、深く感謝いたします。

本研究を共に遂行し、ご協力を頂きました、乗船実習科の竹岡康晴、土井学、学部 4 年生の田口裕章、舩田貴士の各諸氏本当にありがとうございました。また学生生活を共に励まし合った博士後期課程 1 年の小林健次氏に感謝いたします。非力ながら、こうして論文を修めることができたのはこうした多くの方たちの支えがあったからこそであります。

最後に、このような有意義な学生生活を支援して社会に出るまでの道を与えてくれた両親に感謝いたします。

平成 10 年 7 月 31 日

田村 祥一

## 参考文献

- (1) 星, 原子力学会誌, 38-3, (1996), p. 216
- (2) Marks, J. S. and Andeen, G. B., Proc. 18th National Heat Transfer Conference, (1979), p.93
- (3) 久木田、他 5 名, 原研レポート, 26-1 (1981)
- (4) Nariai, H. and Aya, I., Proc. 22nd National Heat Transfer Conf. and Exhibition, Niagara Falls, New York, (1984), p. 11
- (5) Bailey, J. F., Trans. ASME, (1951), p. 1109
- (6) Hardekompf, F. and Mewes, D., Chem. Eng. Technol., vol. 12 (1989), p. 89
- (7) 賞雅、他 3 名, 原子力学会秋の大会予稿集, (1995), p. 336
- (8) 頼経、他 4 名, 原子力学会秋の大会予稿集, (1995), p. 339
- (9) Takamasa, T., 他 2 名 Proc. 31st National Heat Transfer Conf., 92 (1996), p. 174
- (10) Takamasa, T., 他 2 名, Proc. 10th Pacific Basin Nuclear Conf., 1, (1996), p. 439
- (11) Takamasa, T., Tamura, S., 他 2 名, Proc. 8th International Topical Meetings on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics., 3, (1997), p. 1500
- (12) 賞雅, 他 2 名, 原子力学会誌, 39-1, (1997), p. 78
- (13) 賞雅, 田村, 他 3 名, 原子力学会春の大会予稿集, (1997), p. 300
- (14) 賞雅, 田村, 混相流シンポジウム'97講演論文集, (1997), p. 209
- (15) Takamasa, T., Tamura, S., 他 2 名, Proc. of the 6th International Conference on Nuclear Engineering, (1998), p. 532
- (16) 賞雅, 田村, 他 1 名, 混相流シンポジウム'98講演論文集, 投稿中
- (17) 佐藤、他 4 名, 機械学会論文集、50-459, B(1984), p. 2661
- (18) 滝本、他 2 名, 機械学会論文集、61-584, B(1995), p. 1560
- (19) Benjamin, M. W. and Miller, J. G., Trans. ASME, (1941), p. 419
- (20) Pasqua, P. E., Refrigerating Prog., vol. 61 (1953), p. 1084

- 
- 
- (21) Hayamizu, Y., 他 4 名, Proceedings of the International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Vol. 3, (1992), pp.25.5-1
  - (22) 綾、船舶技術研究所報告, Supplement No. 10 (1988)
  - (23) 福田、原子力学会誌, 29-3, (1994), p. 466
  - (24) 賞雅、他 2 名, 船用機関学会誌、29-3 (1994), p. 233
  - (25) 賞雅、他 3 名, 機械学会論文集、60-579, B(1994), p. 3880
  - (26) Takamasa, T. 他 3 名, Proceeding of International Symposium on Marine Engineering, Yokohama, vol. 2 (1995), p. 93
-

## APPENDIX A 大型船用原子炉（MRX）の概要

### A-1 MRXの特徴

MRXは一体型PWR、水張式格納方式などの概念を採用し、高い安全性を小型化・軽量化を同時に達成しようとする船用炉である。これらの概念により、MRXは出力が「むつ」の約3倍であるにもかかわらず、格納容器容積は約0.7倍、重量は約0.5倍となり、飛躍的な軽量・小型化が図られている。また、炉心緊急注水系が無くとも、受動的に崩壊熱除去が可能であり、プラント固有の安全性を高めている。図A-1にプラント概念図を示す。また、図A-2に「むつ」の炉プラントとMRXを比較したものを示す。MRXの概念を以下に述べる。

#### 1) 一体型PWR方式

分離型PWRでは原子炉の外側に設置されている蒸気発生器や循環ポンプ、及び加圧器等などをMRXでは原子炉容器に内蔵し、1次系をほぼ原子炉容器内に包容する一体型PWRとしている。そのために、大口径配管が無く配管の破断事故は小口径配管の破断事故に限られるので、安全系が簡素化される。また、原子炉容器は大きくなるが、プラント全体として小型化することができる。

#### 2) 原子炉容器内装型制御棒駆動機構

従来、原子炉容器の外側に設置されている制御棒駆動機構を原子炉容器内に内蔵することにより、プラントの小型化を図り、制御棒飛び出し事故の原因を排除して安全性を高めることを目的としている。このような制御棒駆動機構は、中国のNHU-5において水圧駆動の十字型側御棒が、MRXにおいてモータ駆動方式のクラスター型制御棒が、それぞれ研究されている。

#### 3) 水張式格納容器

水を充填した格納容器内に原子炉容器を設置し、1次冷却水損失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)の様な事故時においても受動的に炉心の冠水



を維持して、緊急注水が無くとも炉心損傷を防止するようにしている。受動的に炉心の冠水を維持している。また、格納容器内の水を放射線遮蔽として有効に活用することにより、格納容器外側の二次遮蔽体をなくしプラントの軽量・小型化を達成する。

#### 4) 受動的崩壊熱除去系

受動的崩壊熱除去設備は、非常用崩壊熱除去設備と非常用格納容器水冷却設備から成り、主蒸気管破断、蒸気発生器伝熱管破損、及びLOCA等の事故時に自然循環により崩壊熱を除去するシステムである。図A-3に受動的崩壊熱除去系の系統概念を示す。この崩壊熱除去系の作動に必要な外部からの動作は隔離弁の開放のみである。事故が発生すると、原子炉スクラム信号を受けて隔離弁が開放され、原子炉容器内に保有されている1次冷却水はループ内の密度差による自然循環によって格納容器に設置した冷却器に導かれ、格納容器との熱交換によって冷却される。

格納容器水中に放出された熱は、ヒートパイプ式の非常用格納容器水冷却系で大気へ放出される。これらの設備により、事故時の受動的崩壊熱の除去が可能となり、プラント固有の安全性を高めることができる

#### 5) 高度自動化

人工知能(AI)システムを取り入れ、起動前点検、起動操作、出力調整、停止操作、異常・事故対応、監視・診断などの運転・監視を総合的に行い、運転員の大幅削減を図っている

#### 6) 原子炉格納容器一括搬出方式

原子炉システムを格納容器ごと一括搬出(カセット方式)し、専用の点検・保守施設に移送することにより、燃料交換、点検・保守・補修作業などの合理化を図っている

## A-2 1次冷却水

MRXの1次冷却系統は、原子炉容器、蒸気発生器、1次冷却水ポンプ、加圧器などの1次冷却設備構成機器と、加圧スプレイ系統、体積制御系統など原子炉容器外の補助設備からなり、1次冷却材圧力バウンダリが構成される。図A-4に1次冷却材圧力バウンダリ説明図を示す。

炉心を通過し過熱された1次冷却水は蒸気発生器においてその熱を2次系に伝え、再び炉心に戻る。加圧器と主冷却部分は、サージ孔で建絡し負荷変動時の1次冷却水の膨張、及び収縮サージを加圧器により吸収している。

## A-3 2次冷却水

図A-5にMRXの2次冷却系系統図を示す。

### (1) 給水系統

給水系統は、蒸気発生器への適切な圧力・温度の給水を行い、主給水ポンプ・高圧給水加熱器・主給水制御弁などを經由して蒸気発生器に至る主給水系統、及び補助給水ポンプ・補助給水制御弁を経て主給水系統に合流する補助給水系統で構成される。これらの給水はいずれもディアラータから吸引する。

給水系統の主要機器の概念を以下に示す

#### 1) 主給水ポンプ

全負荷流量の50%容量の蒸気タービン駆動主給水ポンプが3基設置される。

#### 2) 高圧給水加熱器

給水を所定の温度まで加熱する。

#### 3) 補助給水ポンプ

電気駆動補助給水ポンプが2基設置され原子炉の起動・停止時の他、事故時の蒸気発生器残留熱除去用に用いられる。

### (2) 主蒸気系統

主蒸気系統は、主機タービン、基底負荷用発電機タービン、及び主給水

ポンプタービンなどへの蒸気供給系統ならびに蒸気ダンプ系統で構成され、蒸気発生器で発生した蒸気をタービンへ供給し、タービンバイパス制御によって原子炉出力調整、及び負荷急減時の圧力を調整する機能を持っている。

蒸気発生器から導かれる2本の蒸気管は、格納容器、及び原子炉室を経て機関室で合流し、各構成機器へ蒸気を供給する。

主蒸気系統の主要機器を以下に示す。

1) 主機タービン

復水式主機タービンが、原子炉 1 基に対して 1 基設置される。

2) 基底負荷用発電機タービン

復水式基底負荷用発電機タービンが、2 基設置される。

3) 主給水ポンプタービン

背圧式主給水ポンプタービンが 3 基設置され、出力運転時にはそのうちの 2 基が使用される。ポンプタービンの排気は、ディアレタの給水加熱に利用される。

4) 蒸気ダンプ

蒸気ダンプ弁の設定は、タービンバイパス制御による原子炉出力一定制御、急激な負荷減少時の主蒸気系の圧力上昇の緩和、及び主蒸気安全弁の設定値までの圧力上昇の防止を目的としている。蒸気ダンプ弁の作動により余剰蒸気は主復水器にダンプされる

5) 主蒸気安全弁

主蒸気安全弁は、主蒸気系統に 2 基設けてあり、主蒸気系統を過度の圧力から保護する。2 つの安全弁を合わせると全負荷蒸気流量を大気に放出できる容量を持っている。

6) 主蒸気隔離弁

主蒸気隔離弁は、主蒸気管破断時に主蒸気系統を隔離する。伝熱管破損時には、破損側の蒸気発生器ループが隔離される。

## A-4 原子炉制御系統

MRXの制御設備には、制御棒制御系、加圧器圧力制御系、及び給水制御系により構成される。

### 1) 制御棒制御系

制御棒制御系は、温度チャンネル、出力不一致チャンネルにより構成される。温度信号には、炉心平均温度信号と平均温度基準値との偏差信号が、出力不一致信号は中性子束と主機タービンに入る蒸気流量の偏差信号が、それぞれ用いられている。

### 2) 加圧器圧力制御系

加圧器圧力制御系は、1次系圧力が一定になるようにスプレイ、逃がし弁、及び電気ヒータを制御する。制御信号には、加圧器基準圧力と実際の加圧器圧力との偏差信号が用いられる。

### 3) 給水制御系

給水制御系は主機タービンに入る蒸気の圧力を一定に保つように給水制御弁の開度を調整する。制御信号には、蒸気圧力、給水流量、蒸気流量、及び主機タービン弁開度の4要素が用いられる。

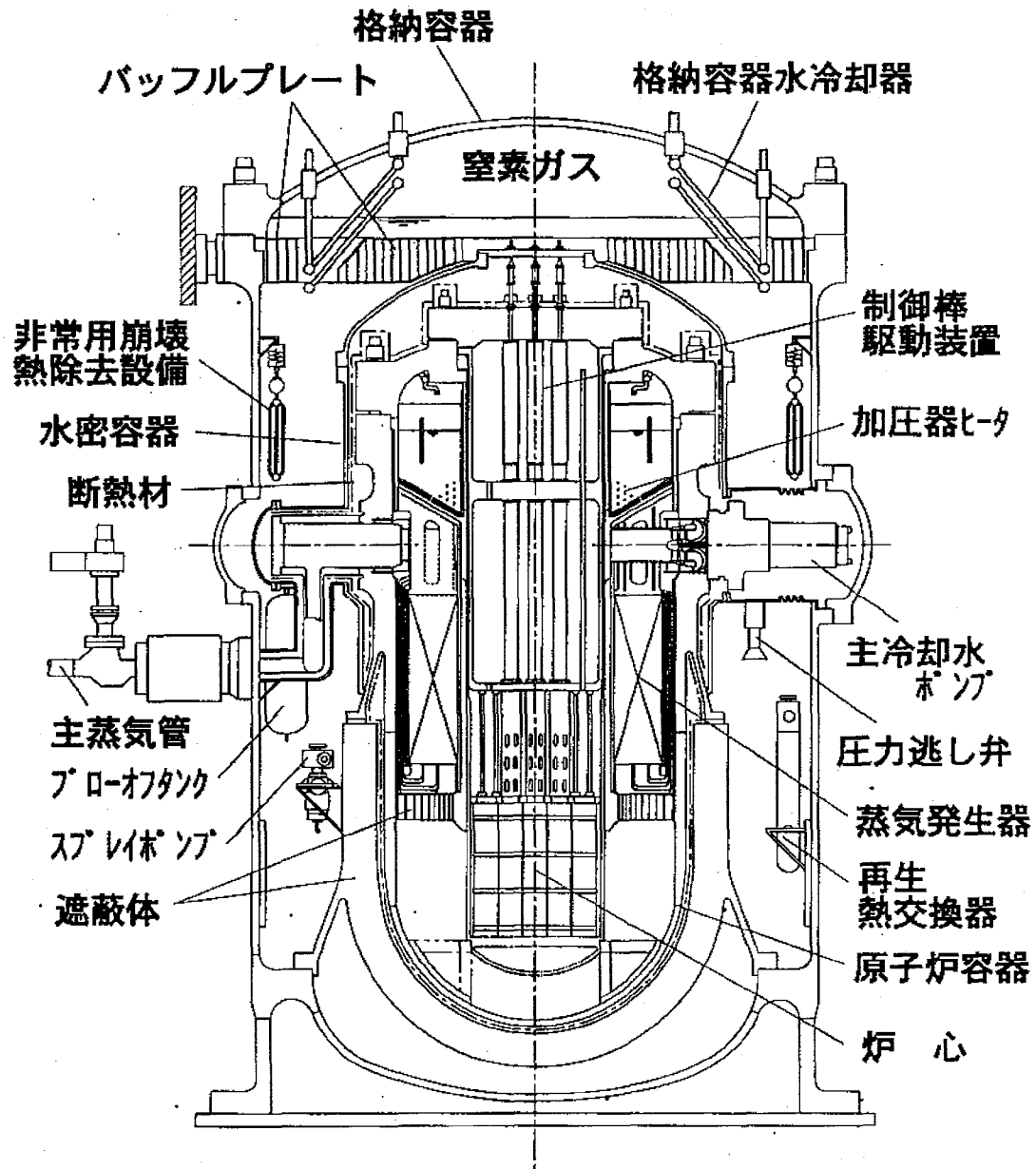


図 A-1 MRXプラントの概念図

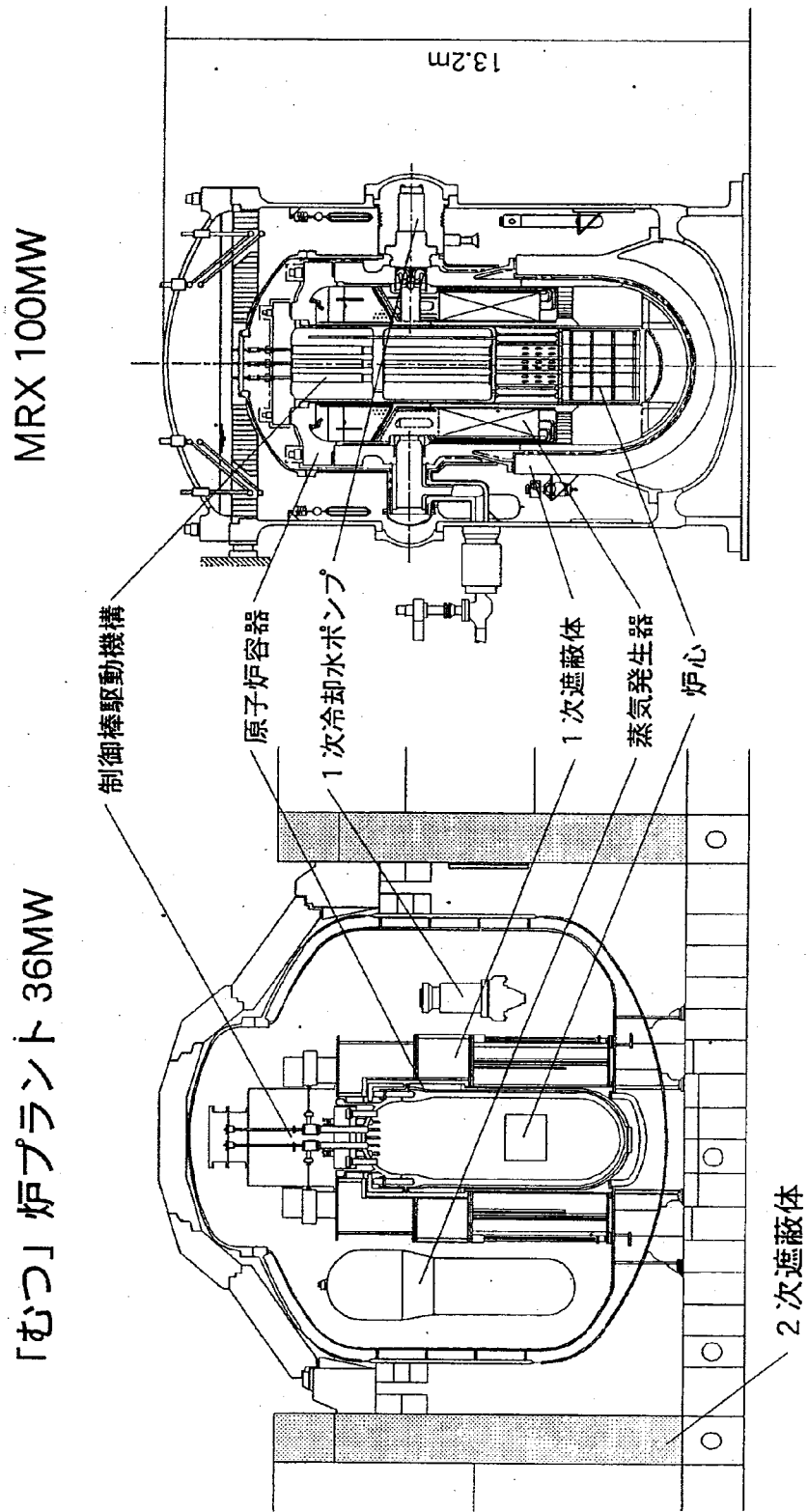


図 A-2 「むつ」の炉プラントとMRXの比較

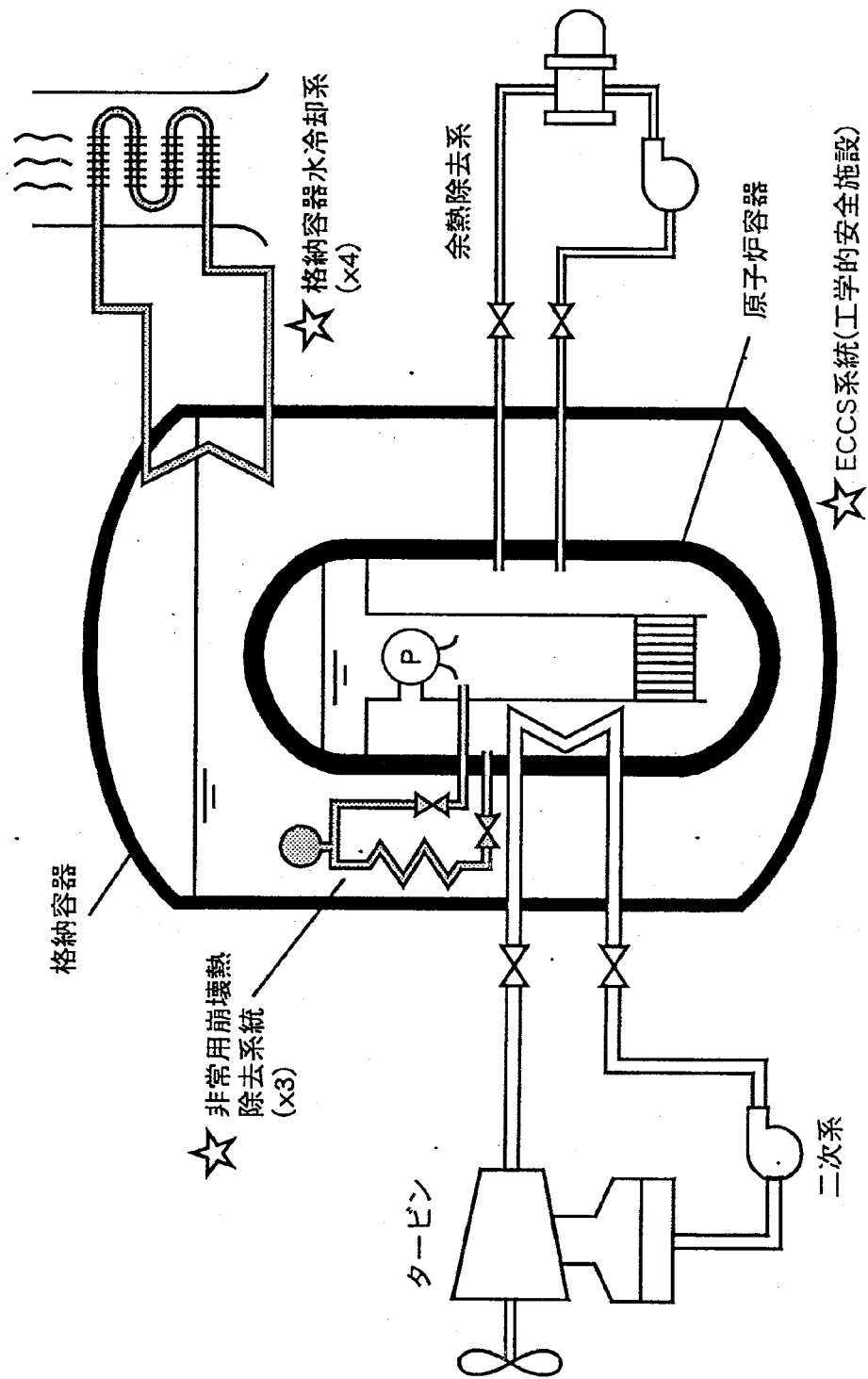


図 A-3 受動的崩壊熱除去系の系統概念

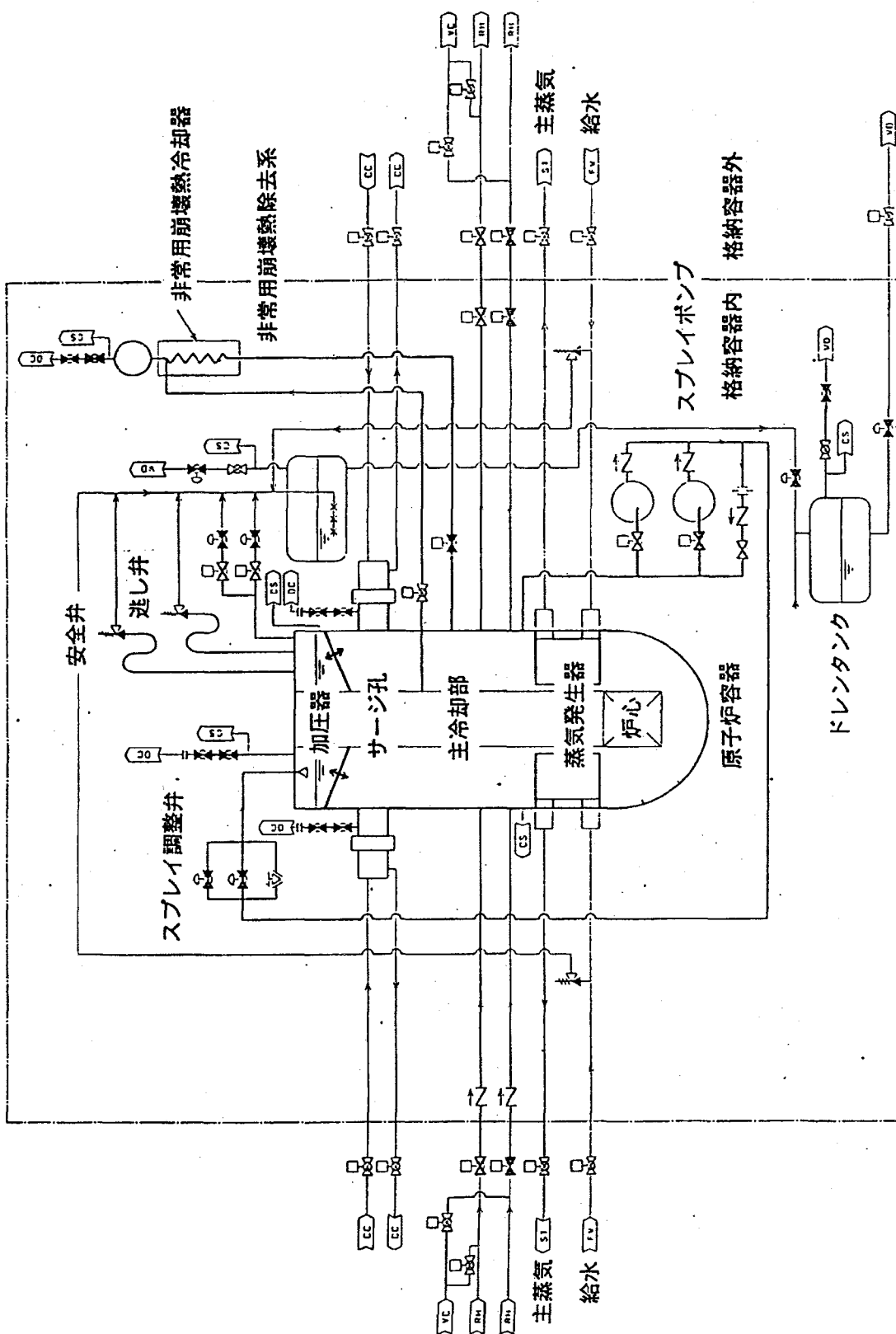


図 A-4 1次冷却材圧力バウンダリ

—— 原子炉冷却材圧力  
バウンダリを示す。



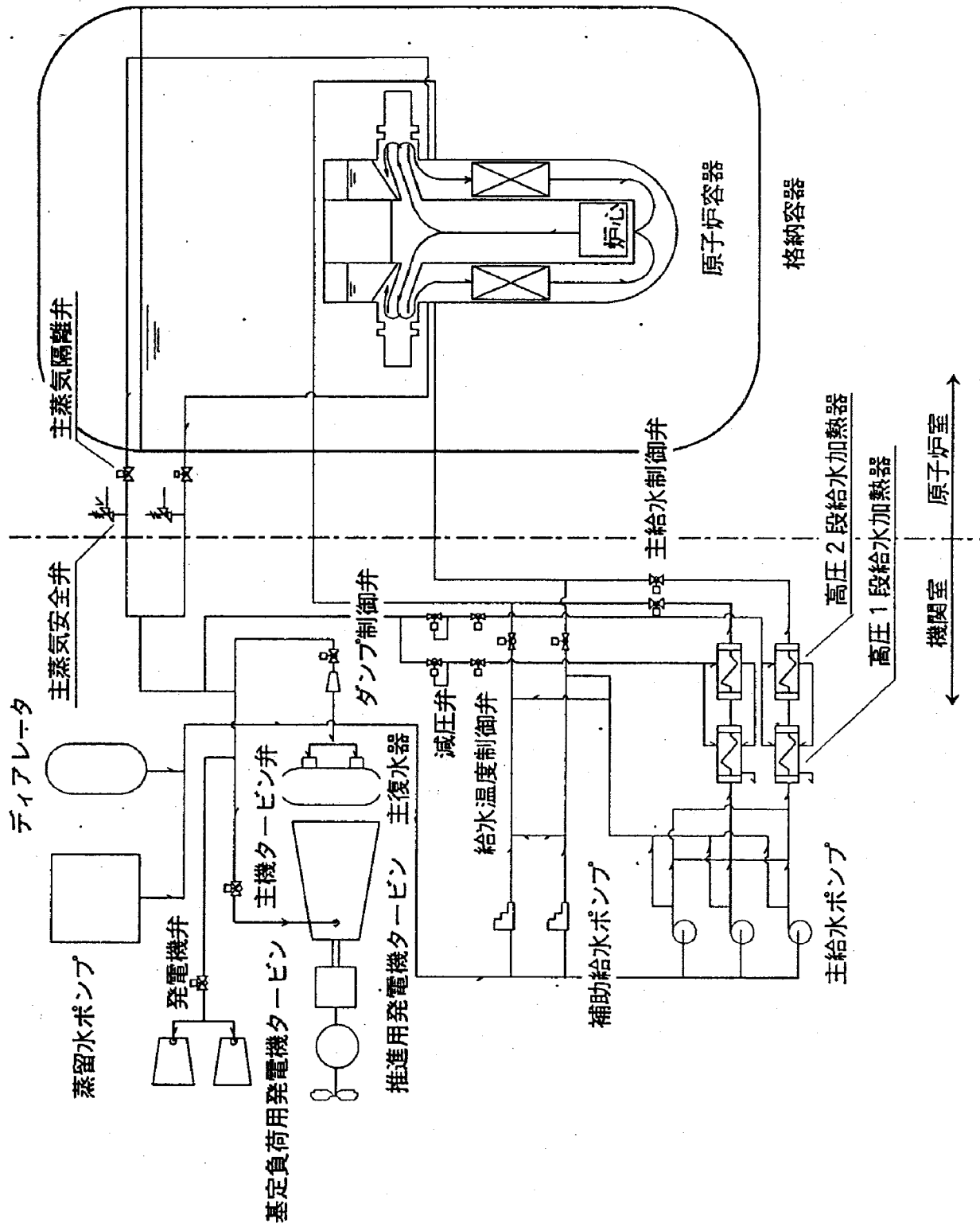


図 A-5 MRXの2次冷却系系統図

## APPENDIX B 解析プログラム

本研究で使⽤した解析プログラムを示す。

```

1: '-----
2: ' 飽和水物性値算出プログラム
3: '          Programed by S. Tamura
4: '          '98/4/2
5: '-----
6: #include "WINDOWS.BI"
7:
8: var shared D(1000,5)
9:
10: FILE$ = WINOPENDLG("File open","*.*","All file(*.
    *)",0)
11: if FILE$<>chr$(&H1B) then
12:     open FILE$ for input as #1
13:     I=1
14:     while not eof(1)
15:         for L=1 to 5
16:             input #1,D(I,L)
17:         next L
18:         I=I+1
19:     wend
20: close #1
21: end if
22: '-----実験条件-----
23: input "放出孔径(mm)=";DV
24: input "放出孔長さ(mm)=";LV
25: input "サブクール度(K)=";DT
26: '-----圧力(MPa)代入-----
27: print "i=";I
28: for A=1 to I-1
29:     print D(A,1);D(A,2);D(A,3);D(A,4);D(A,5)
30: next A
31:
32: input "Press(MPa)=";P
33: PP=P*10^6
34: for A=1 to I-1
35:     if P>D(A,1) and P<D(A+1,1) then N=A : goto *MITU
36: next A
37: '-----密度計算-----
38: *MITU
39: R1=(D(N,3)-D(N+1,3))/(D(N+1,1)-D(N,1))
40: R2=P-D(N,1)
41: RW=D(N,3)-R1*R2
42:
43: '-----飽和温度-----
44: T=(D(N,2)-D(N+1,2))/(D(N+1,1)-D(N,1))
45: TT=D(N,2)-T*R2
46: '-----エンタルピ (飽和水) -----
47: H1=(D(N+1,4)-D(N,4))/(D(N+1,1)-D(N,1))
48: H=D(N,4)+H1*R2 : goto *ENMIZU
49: *ENMIZU
50:
51: '-----エンタルピ (蒸気) -----

```

```

53: HH=D(N,5)+H2*R2 : goto *ENJYOU
54: *ENJYOU
55: '
56: '-----潜熱-----
57: SEN=(HH-H)*1000 : goto *SENNETU
58: *SENNETU
59: '-----フラッシング率-----
60: F=(TT-273.15)/273.15
61: FF=(3.14/F)^(3/2)
62: print "F=";F
63: '
64: '-----( $\partial P / \partial \rho_s$ )-----
65: PRO=-1.824*10^-2
66: '
67: '-----振動数(実験式)-----
68: NYU=0.67*((DT^0.75)/(DV^1.12*PP^0.27*LV^0.04))
69: print "周波数=";NYU
70: '
71: '-----熱伝達率計算-----
72: HHHH=(4*PI/sqr(3))*(RW/48)*(1/FF)*(1/PRO)*(NYU^3)
73: HHH=(HHHH^(2/5))*(L/TT)
74: '
75: '-----データ保存-----
76: FILE2$=WINSAVEDLG("File save","*.*","All file(*.*)",0)
77: if FILE2$<>chr$(&H1B) then
78:     open FILE2$ for output as #2
79:     print "飽和温度(K)=";TT
80:     print "密度(kg/m^3)=";RW
81:     print "エンタルピ(飽和水)(kJ/kg)=";H
82:     print "エンタルピ(蒸気)(kJ/kg)=";HH
83:     print "潜熱(J/kg)=";SEN
84:     print "熱伝達率(W/M^2K)=";HHH
85:
86:     input z$
87:     close #2

```

```

1: '-----
2: 'Freon-12 Pasqua 実験式
3: '          Programed by S. Tamura
4: '          '98/5/13
5: '-----
6: #include "WINDOWS.BI"
7:
8: var shared D(1000,5)
9:
10: FILE$ = WINOPENDLG("File open", "*.*", "All file(*.
    *)", 0)
11: if FILE$ <> chr$(&H1B) then
12:     open FILE$ for input as #1
13:     I=1
14:     while not eof(1)
15:         for L=1 to 5
16:             input #1, D(I, L)
17:         next L
18:         I=I+1
19:     wend
20: close #1
21: end if
22: '----- 実験条件 -----
23: input "放出孔径(mm)="; DV
24: input "放出孔長さ(mm)="; LV
25: input "一般的な流量係数="; CV
26: '----- 圧力(MPa)代入 -----
27: 'print "i="; I
28: 'for A=1 to I-1
29: '    print D(A, 1); D(A, 2); D(A, 3); D(A, 4); D(A, 5)
30: 'next A
31:
32: input "Press(MPa)="; P
33: PP=P*10^6
34: for A=1 to I-1
35: if P>D(A, 1) and P<D(A+1, 1) then N=A : goto *MITU
36: next A
37: '----- 密度計算 -----
38: *MITU
39: R1=(D(N, 3)-D(N+1, 3))/(D(N+1, 1)-D(N, 1))
40: R2=P-D(N, 1)
41: RW=D(N, 3)-R1*R2
42: print "高圧飽和水密度"; RW
43: '----- 係数A計算 -----
44: A=0.37*((LV/DV)^0.2)-0.4
45: print "A="; A
46: '----- 係数B計算 -----

```

---

```

53: DA=(3.14*(DV*10^-3)^2)/4
54: '-----流量計算-----
55: G=CE*CV*DA*(sqr(2*9.8*RW*(P-0.1)*10^5))
56:
57: '-----データ保存-----
58: FILE3$=WINSAVEDLG("File save","*.*","ALL file(*.*
   )",0)
59: if FILE3$<>chr$(&H1B) then
60:     open FILE3$ for output as #3
61:     for P2=1 to 35
62:         print #3,P(P2),NYU(P2),DT(P2),QH(P2),H3(
   P2)
63:     next P2
64:     close #3
65: end if

```

---

## APPENDIX C 流量測定結果

本文中で使用しなかった各実験条件における流量測定結果を示す。

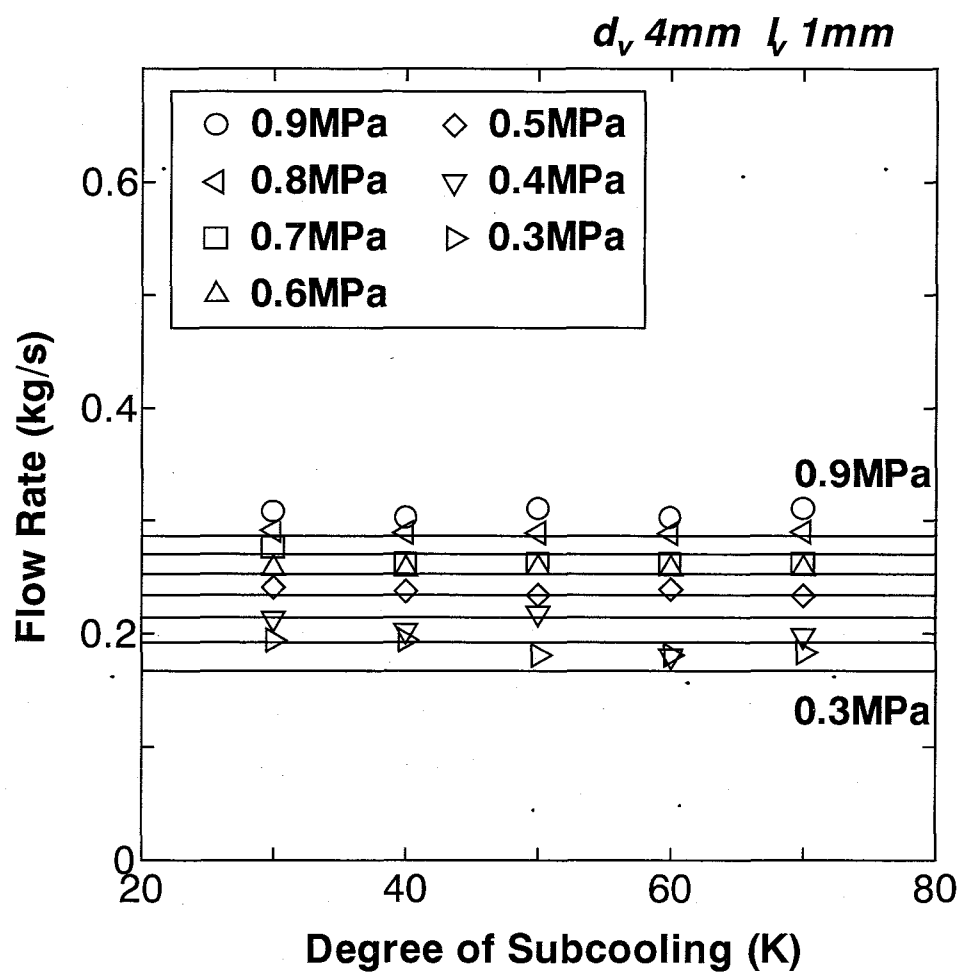


図 C-1 流量測定結果



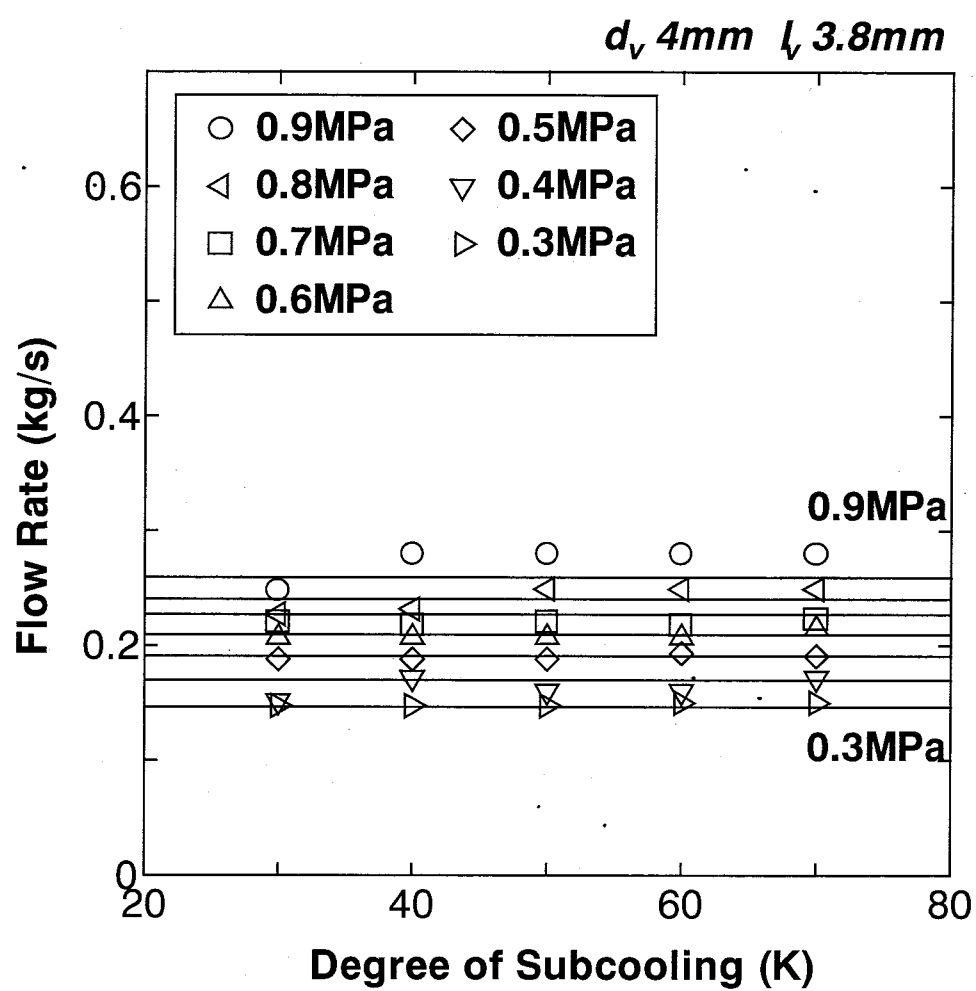


図 C-2 流量測定結果

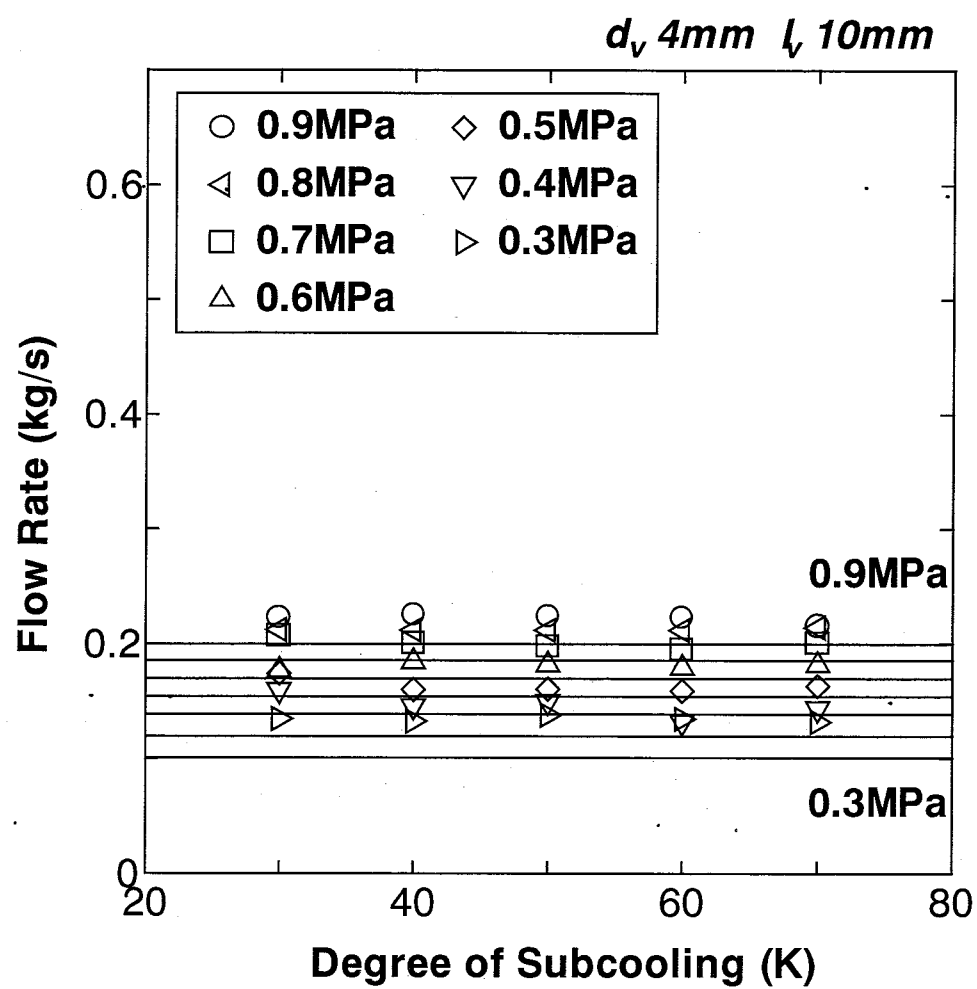


図 C-3 流量測定結果

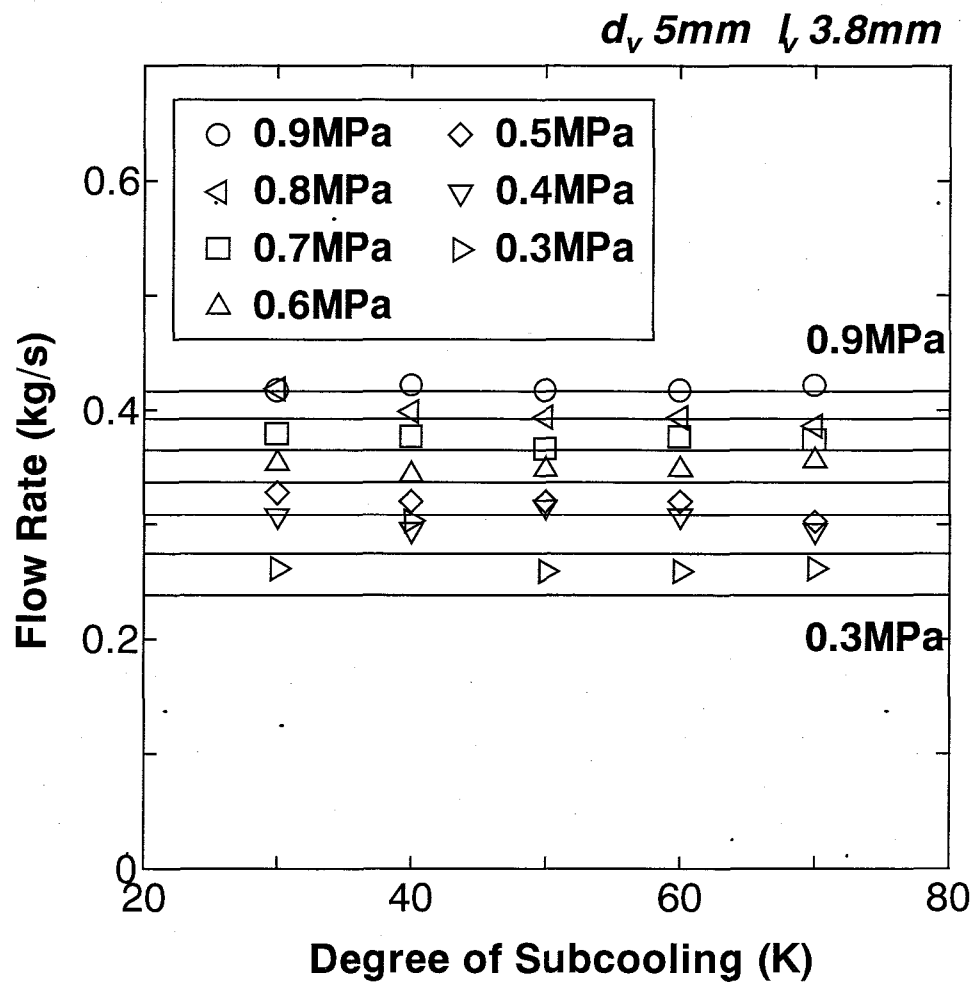


図 C-4 流量測定結果

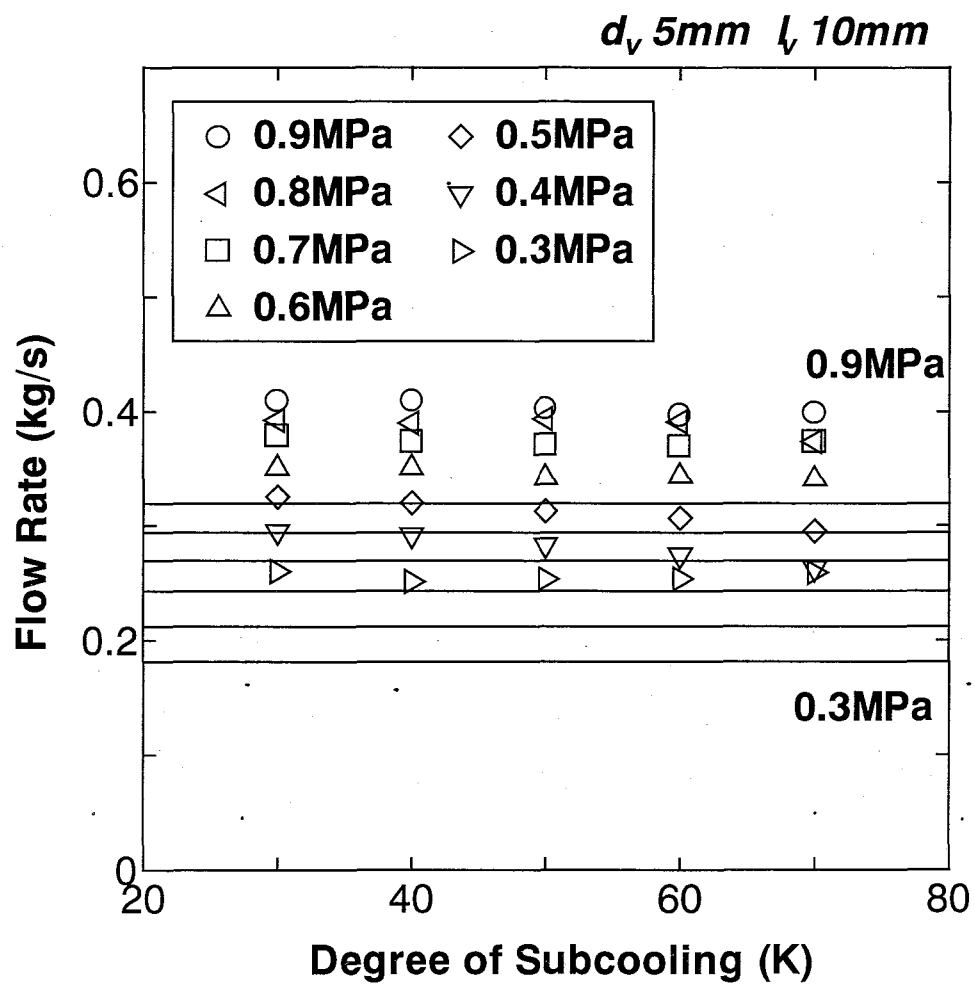


図 C-5 流量測定結果

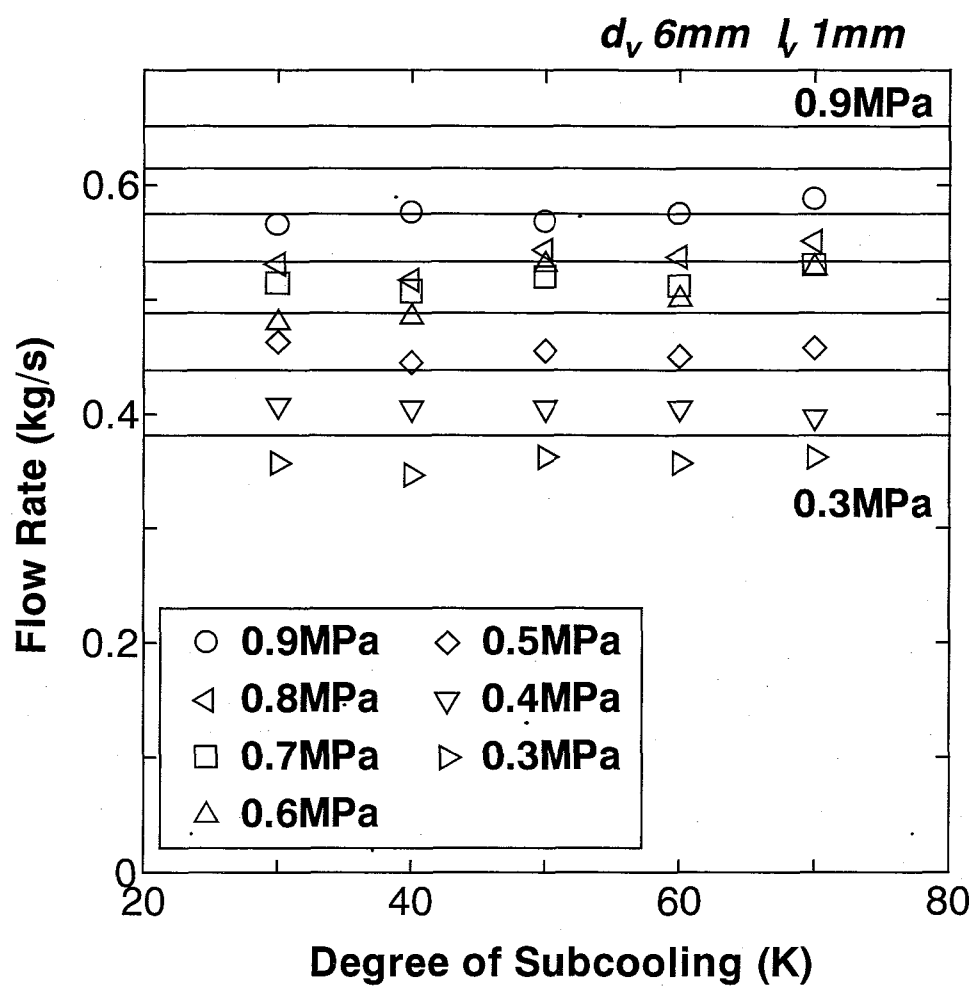


図 C-6 流量測定結果

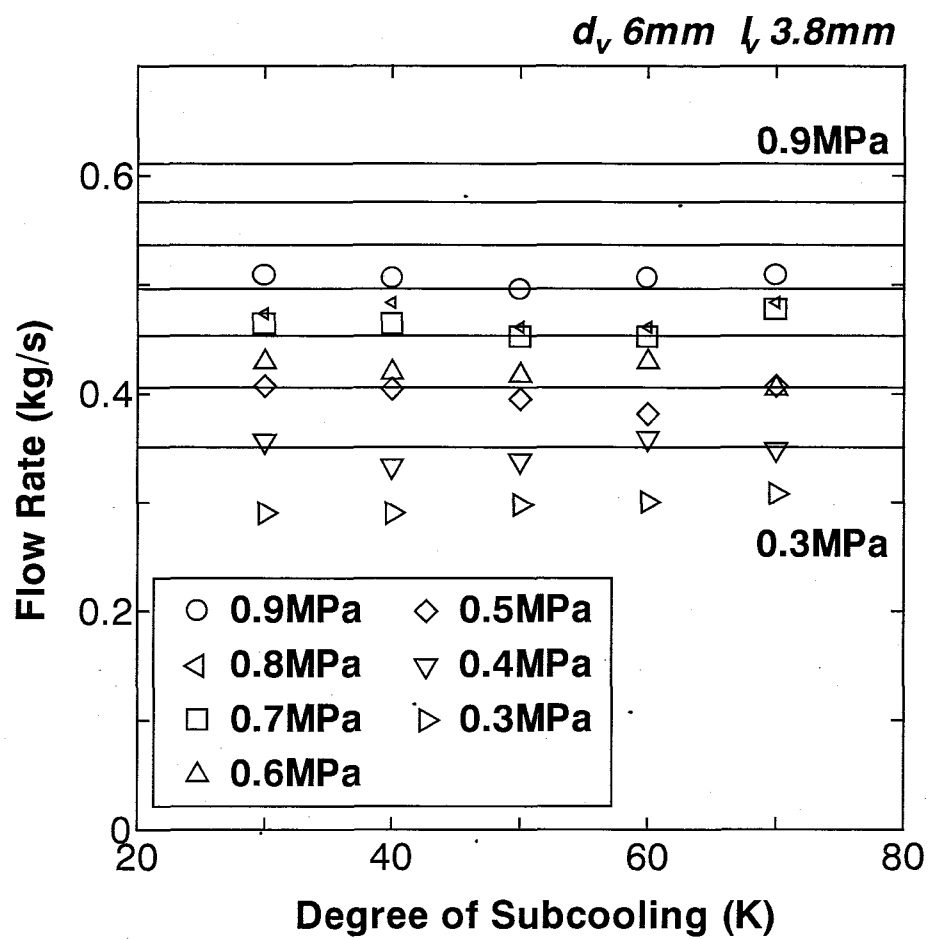
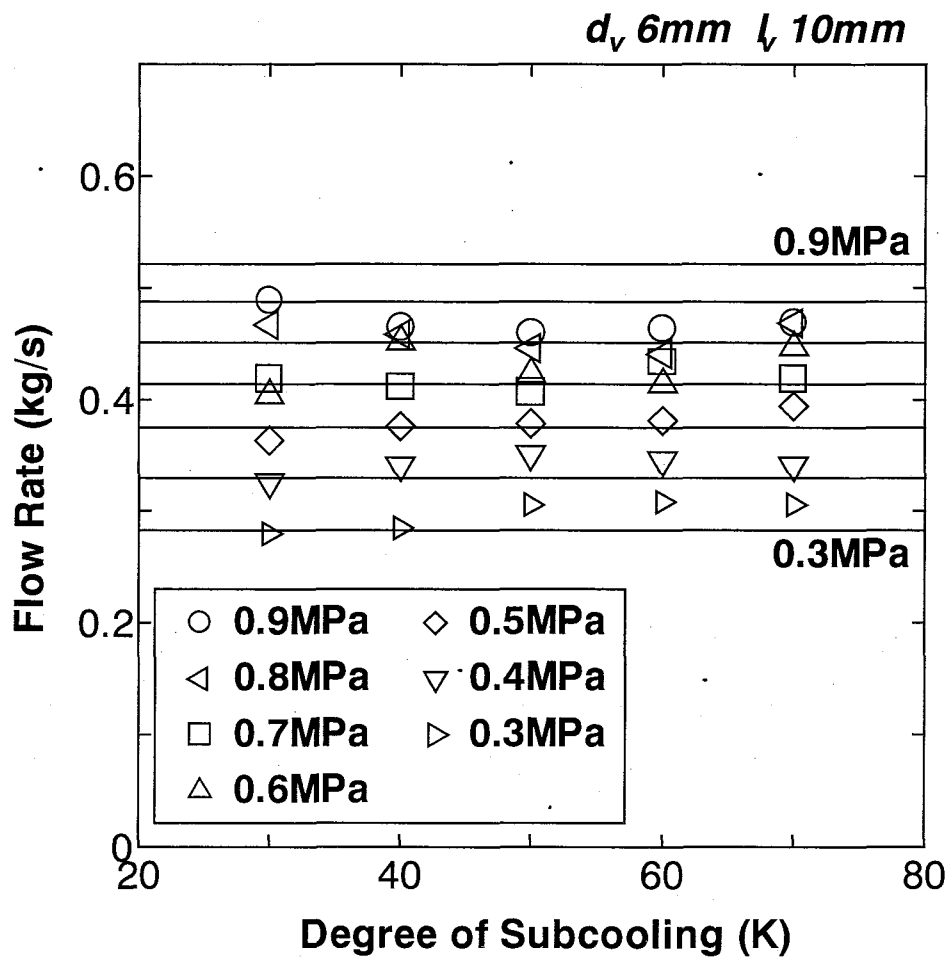


図 C-7 流量測定結果



図C-8 流量測定結果